
Modellprädiktive Abfluss- steuerung mit hydrodynamischen Kanalnetzmodellen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation von

Dipl.-Ing. Steffen Heusch aus Darmstadt

Darmstadt, 2011 – D17

Modellprädiktive Abflusssteuerung mit hydrodynamischen Kanalnetzmodellen

Dissertation von Steffen Heusch

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Manfred Ostrowski
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

Tag der Einreichung: 6. Dezember 2010

Tag der Prüfung: 1. März 2011

Darmstadt – D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-25593

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2559>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,
E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 2.0 Deutschland

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Vorwort

Kanalnetze wurden in Deutschland nach einheitlichen nationalen Standards geplant und gebaut, wobei die Hoheit der Bundesländer zu geringfügigen Unterschieden bei der Wahl des Entwässerungsverfahrens und der Umsetzung der Gesetzgebung des Bundes in Landesrecht geführt hat. Diese Standards waren in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts auf Grenzwerte der Überstauhäufigkeiten und Emissionen ausgerichtet. Spätestens seit der Einführung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie werden Einleitungen aus Kläranlagen und Kanalisationsnetzen auch aus der Sicht des aufnehmenden Gewässers beurteilt. In kritischen Situationen sind Maßnahmen zur deren Verbesserung oder Beseitigung zu identifizieren. Dazu müssen potentiell mögliche Maßnahmen bewertend miteinander verglichen werden, um ein möglichst optimales Maßnahmenpaket zu schnüren. Dabei stellt die optimale Aktivierung des im Netz vorhandenen Speichervolumens durch Steuerung eine grundsätzlich mit zu betrachtende Maßnahmenalternative dar. Etwa zwischen 1995 und 2005 wurde die Abflusssteuerung von verschiedenen Wissenschaftlern untersucht und es wurden zwischenzeitliche Erkenntnisse zusammengefasst: Die Kanalnetzsteuerung, kann, muss jedoch nicht ein effektiver und effizienter Beitrag zum Gewässerschutz sein. Vielfach diskutierte Fragen war stets, aufgrund welcher Informationen und nach welchen Prinzipien und Kriterien ein Netz zu steuern ist. Einvernehmlich war bisher auch der Schluss, dass die Steuerung aufgrund zeitnaher Abflussvorhersagen bei Beobachtung des aktuellen Niederschlags gute Ergebnisse erwarten lässt, dass andererseits jedoch noch Schwierigkeiten aufgrund der Performanz von Vorhersagesystemen in Bezug auf Zuverlässigkeit und Rechenzeiten vorhanden sind.

In der Diskussion ist inzwischen eine mehrjährige Pause eingetreten. Zwischenzeitlich eingetretene Änderungen bezüglich verbesserter Algorithmen, Monitoring und Messsysteme sowie erhöhter Rechnerleistungen wurden in den letzten fünf Jahren kaum bewertet. Diesen Fragen hat sich Steffen Heusch in seiner Arbeit zugewandt.

Er hat damit einen wichtigen Beitrag zum aktuellen Stand der Wissenschaft und der Technik einer adaptiven modellbasierten Steuerung von Kanalnetzen vorgelegt. Die interdisziplinäre Kooperation mit Mathematikern hat mit der oft geäußerten Meinung aufgeräumt, signifikante Verbesserungen bei der mathematischen Simulation und Optimierung seien nicht mehr möglich. Er hat aufgezeigt, dass inzwischen auch mit lange bekannten hydrodynamischen Simulationsverfahren eine modellprädiktive Steuerung möglich ist. In diesem Sinne müssen lange gültige Einschränkungen überdacht werden. Er zeigt aber auch, dass eine vollständig automatische Steuerung immer noch nicht realisierbar ist. Die Steuerung des Optimierungsablaufs selber bleibt nach wie vor ein durch Expertenwissen zu unterstützender Prozess. Bisher wurden derartige Forschungsinitiativen immer in Zyklen mit vieljährigen Unterbrechungen durchgeführt. Die Arbeit hat gezeigt, dass der wissenschaftliche und technologische Fortschritt auf dem Gebiet der modellprädiktiven optimalen Kanalnetzsteuerung derartig rasant ist, dass bereits nach wenigen Jahren seit der letzten Beschreibung des Standes der Wissenschaft mit dieser Arbeit bedeutsame Fragen beantwortet werden konnten.



Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung der TU Darmstadt.

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Ostrowski für das mir entgegen gebrachte Vertrauen und seine Unterstützung während meiner Zeit am Fachgebiet danken. Dafür, dass er es mir als Doktorvater ermöglichte, diese Arbeit anzufertigen und für eine hervorragende Stimmung und Arbeitsatmosphäre am Fachgebiet, wodurch mir drei wunderbare Jahre beschert wurden.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt von der TU Kaiserslautern möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und seine Anmerkungen und Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken.

Bei den folgenden Personen möchte ich mich ebenfalls bedanken, da sie jeweils auf ihre Art zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben:

Herrn Dr.-Ing. Detlev Belke und Herrn Dr.-Ing. Ralf Mehler für das Gegenlesen des Manuskripts und die damit verbundenen weiteren Diskussionen.

Meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Michael Bach für viele konstruktive Gespräche und eine hervorragende Stimmung in unserem Arbeitszimmer, das wir uns drei Jahre geteilt haben.

Herrn Dr.-Ing. Dirk Muschalla für den produktiven Gedankenaustausch rund um das Thema Entwässerung und insbesondere die Abflusssteuerung.

Herrn Dipl.-Ing. Dominik Kerber sowie den Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Frank Reußner und Herrn Dipl.-Ing. Felix Fröhlich für ihre tatkräftige Unterstützung bei Fragen zur Softwareentwicklung und Quellcodeverwaltung.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau und meiner Familie, die mich zu jeder Zeit unterstützt haben.

Darmstadt, im April 2011

Steffen Heusch



Kurzfassung

Im Rahmen der Arbeit werden die Einsatzmöglichkeiten der modellprädiktiven Steuerung in der Entwässerungsplanung untersucht, wobei insbesondere die Verwendung von hydrodynamischen Kanalnetzmodellen für die Prozessmodellierung sowie die Leistungsfähigkeit von lokalen und globalen Optimierungsverfahren im Mittelpunkt stehen.

Für die Untersuchungen wurden zwei Berechnungsansätze verwendet. Zunächst wurde ein iterativer Ansatz entwickelt, der die modellprädiktive Abflusssteuerung auf der Basis direkter Optimierung ermöglicht. Hierbei wird das Prozessmodell ausschließlich als Black-Box zur Zielfunktionsauswertung verwendet. Bei dieser iterativen Vorgehensweise wird das Prozess- bzw. Simulationsmodell „direkt“ ohne Umformung der zu Grunde liegenden mathematischen Modellformulierung eingesetzt. Der entwickelte Berechnungsansatz zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität aus: Das Modul für die Prozesssteuerung unterscheidet zwischen Evaluierungs-, Vorhersage- und Kontrollhorizont. Die Länge der Zeithorizonte ist ebenso wie die Länge des Steuerungszeitschrittes frei wählbar. Das Optimierungsmodul ermöglicht den Einsatz von lokalen und globalen Optimierungsverfahren und das Modul für die Prozessmodellierung erlaubt sowohl abfluss- als auch schmutzfrachtbasierte Steuerungen.

Der zweite Berechnungsansatz stellt einen analytischen Ansatz dar, bei dem für die Optimierung erstmals ein ableitungsbasiertes Verfahren zur modellprädiktiven Steuerung mit einem hydrodynamischen Kanalnetzmodell eingesetzt wird. Der Berechnungsansatz wurde an der Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt, bei dem aktuelle mathematische Methoden in siedlungswasserwirtschaftliche Werkzeuge implementiert wurden. Da die optimalen Steuerungsentscheidungen durch die Bildung von Differentialquotienten des mathematischen Prozessmodells berechnet werden, wird der Ansatz auch als „indirekter“ Berechnungsansatz bezeichnet. Durch die indirekte (ableitungsbasierte) Optimierung können allerdings ausschließlich lokale Optimierungsverfahren eingesetzt werden. Das für die Prozessmodellierung eingesetzte hydrodynamische Kanalnetzmodell wurde eigens auf der Basis eines Finite-Volumen-Verfahrens entwickelt.

Der Vergleich beider Berechnungsansätze erfolgte an Hand eines einfachen, fiktiven Fallbeispiels. Die Berechnungsergebnisse für die in diesem Fall angesetzten abflussbasierten Steuerungsziele sind hinsichtlich der Steuerungsqualität gleichwertig, d.h. die Verminderung der Entlastungsvolumina ist mit beiden Berechnungsansätzen gleich groß. Aus den Berechnungen lassen sich die folgenden zwei Resultate ableiten: Erstens zeigte sich, dass die modellprädiktive Steuerung mit hydrodynamischer Kanalnetzmodellierung sowohl mit direkten (iterativ) als auch mit indirekten Optimierungsmethoden (analytisch) durchgeführt werden kann. Zweitens zeigte sich, dass die Rechenzeiten des analytischen Berechnungsansatzes deutlich kürzer sind als die des iterativen Berechnungsansatzes. Die kürzeren Rechenzeiten werden durch die ableitungsbasierte Optimierung hervorgerufen. Die Rechenzeiten des für den analytischen Berechnungsansatz neu entwickelten hydrodynamischen Kanalnetzmodells liegen jedoch in der gleichen Größenordnung wie die des Kanalnetzmodells, das für die iterative Steuerung eingesetzt wurde.

Mit dem iterativen Berechnungsansatz wurden weitere Berechnungen durchgeführt. Für das erste Fallbeispiel wurden zusätzlich schmutzfrachtbasierte Steuerungsziele berechnet,

darüber hinaus wurden für zwei weitere, komplexere Fallbeispiele wiederum abflussbasierte Steuerungen durchgeführt. Neben den Rechenzeiten, die bei modellprädiktiven Steuerungen mit komplexen Prozessmodellen immer eine große Herausforderung darstellen, stand bei diesen Berechnungen der Vergleich zwischen lokalen und globalen Optimierungsverfahren im Mittelpunkt. Überprüft wurde die Frage, ob durch die Verwendung eines globalen Verfahrens bessere Steuerungsergebnisse berechnet werden können. Hierfür wurden in allen untersuchten Szenarien der drei Fallbeispiele sowohl globale Evolutionsstrategien als auch das lokale Verfahren von Hooke & Jeeves eingesetzt. In einem Szenario des zweiten Fallbeispiels konnte dabei mit den globalen Evolutionsstrategien ein deutlich besseres Steuerungsergebnis gegenüber dem lokalen Verfahren von Hooke & Jeeves ermittelt werden. In allen anderen Szenarien berechnete das Verfahren von Hooke & Jeeves mindestens gleich gute, in zwei Fällen sogar bessere Ergebnisse.

Generell zeigen die Berechnungen, dass Entwässerungssysteme, die aufgrund ihrer Größe und Komplexität ein ausreichendes Steuerungspotenzial besitzen, unter Verwendung herkömmlicher Computer nicht mit der in der Kanalnetzberechnung üblichen detaillierten Modellgenauigkeit für die modellprädiktive Steuerung mit hydrodynamischen Modellen abgebildet werden können. Die Rechenzeiten sind zu lange, um innerhalb des Steuerungszeitschrittes Steuerungsentscheidungen berechnen zu können. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die globalen Evolutionsstrategien tatsächlich bessere Ergebnisse als das lokale Verfahren von Hooke & Jeeves ermitteln können, diese aber nicht garantieren können. Der Erfolg der Evolutionsstrategien hängt maßgeblich von der zur Verfügung stehenden Anzahl an Zielfunktionsauswertungen, d.h. Simulationsläufen mit dem hydrodynamischen Prozessmodell, ab. Die untersuchten Fallbeispiele zeigten jedoch, dass auch unter Ansatz von vereinfachten Grobnetzen die Anzahl der möglichen Zielfunktionsauswertungen innerhalb des zur Verfügung stehenden Steuerungszeitschrittes beschränkt ist.

Obwohl die Rechenleistungen herkömmlicher Computer auch zukünftig steigen werden, besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich schnellerer Berechnungsprozesse. Erfolgversprechend erscheinen Parallelisierungsansätze. Diese sind sowohl bei der Prozessmodellierung als auch bei der Optimierung einsetzbar. Entsprechende Möglichkeiten wurden in der Arbeit aufgezeigt, in den Fallbeispielen aber noch nicht berücksichtigt.

Abstract

In this thesis the application of model predictive control of urban drainage systems is analyzed. The focus is set on the application of dynamic simulation approaches for process modeling and the performance of local and global optimization algorithms.

The analysis is based on two computational methods: First, an iterative method was developed, in which the process model is strictly used as a black-box to evaluate the objective function without any manipulation of the mathematical formulation of the process model. This method is flexible in regard to the three modules of which the developed simulation tool consists: The module for process control distinguishes between evaluation horizon, prediction horizon and control horizon. The length of these horizons as well as length of the control time step can be set by the user. The optimization tool enables the usage of different optimization methods and the process model allows for the implementation of volume based and pollution based control objectives.

The second method applied in this work was developed at the University of Erlangen-Nürnberg. It is an analytical approach which uses for the first time a derivative based optimization algorithm for model predictive control of sewer networks with a dynamic process model. For process modeling a simulation approach was specially developed which is based on a finite volume method.

Both calculation methods are compared by means of a simple case study. For the volume based control objectives both approaches calculated similar results, i.e. the minimization of the overflow volumes are almost identical. Two outcomes can be derived from the case study: First, it has been shown that model predictive control with dynamic process models is possible with iterative and analytical methods. Secondly, it was shown that the computation times of the analytical method are much shorter. This is due to the derivative based optimization method. Computation times of the newly developed dynamic process model for the analytical approach are approximately the same compared to the process model of the iterative approach.

More calculations were carried out with the iterative approach. In addition to the volume based calculations, pollution based objectives were analyzed for the first case study. Furthermore, two additional more complex case studies were investigated with volume based control objectives. In addition to the calculation times, which is always a critical issue with model predictive control and complex process models, the main focus with these calculations were the performance of local and global optimization methods and the verification of the hypothesis that global optimization methods are required for the control of urban drainage systems because they ascertain better results than local optimization methods. In order to check the hypothesis two different optimization methods were applied in all scenarios: Global evolutionary strategies and the local pattern search algorithm of Hooke & Jeeves. In one scenario of the second case study the evolutionary strategies yielded essentially better results than the Hooke & Jeeves algorithm. In all other scenarios the Hooke & Jeeves algorithms calculated at least equally good results.

The case studies showed that the usually applied detailed models of such sewer networks, which are big enough to sustain a certain degree of control potential, cannot be used for

model predictive control with dynamic process simulation since it is not possible to calculate control decision within the available control time step. Furthermore, it has been shown that the global evolutionary optimization methods are able to deliver better results than local methods but they cannot guarantee it. The success of the evolutionary strategies depends on the number of objective function evaluations, i.e. the number of simulation runs with the dynamic process model. But even with simplified networks the numbers of objective function evaluations were limited within the control time steps.

Even though computing power will increase in future, faster calculation methods are required. A promising feature is the parallelization of algorithms which can be applied for process models as well as for the global optimization methods. Respective approaches were identified but were not implemented in the case studies.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Veranlassung	2
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Aufbau der Arbeit	4
2. Steuerung von urbanen Entwässerungssystemen	6
2.1. Steuerungskonzepte und -methoden	6
2.1.1. Steuerungstypen	6
2.1.2. Steuerungsalgorithmen	7
Offline-Steuerung	8
Online-Steuerung	9
Vergleich der beiden Steuerungsalgorithmen	10
2.1.3. Steuerungsziele	11
2.1.4. Steuerungsstrategien	13
2.2. Steuerungspotenzial	13
2.3. Prozessmodellierung und Optimierung	15
2.3.1. Abflussmodellierung	15
2.3.2. Schmutzfrachtmodellierung	18
2.3.3. Integrierte Modellierung	18
2.3.4. Optimierung	22
2.4. Stand der Technik	28
2.4.1. Abflusssteuerung in der Forschung	31
Integrierte und immissionsorientierte Steuerung	31
Modellprädiktive Steuerung	34
2.4.2. Zusammenfassung	37
2.5. Forschungsbedarf	39
3. Modellprädiktive Abflusssteuerung	41
3.1. Das Prinzip des rollenden Horizonts	42
3.2. Anforderungen an die Optimierung	47
3.3. Anforderungen an die Prozessmodellierung	49
3.4. Herausforderungen bei der modellprädiktiven Steuerung	50
3.4.1. Steuerungsgüte	50
3.4.2. Rechenzeit	50
Beschleunigung der Optimierung	51
Beschleunigung der Prozessmodellierung	51
4. Implementierung des modellprädiktiven Steuerungssystems	53
4.1. Aufbau der Software	53

4.1.1.	Prozesssteuerung mit BlueM.MPC	54
4.1.2.	Optimierung mit BlueM.Opt	56
	Verfahren von Hooke & Jeeves	57
	Evolutionsstrategien	59
4.1.3.	Prozessmodellierung mit SWMM5	62
4.2.	Zusammenfassung	63
5.Anwendungsbeispiele	64
5.1.	Fallbeispiel 1	64
5.1.1.	Systembeschreibung	64
5.1.2.	Abflussbasierte Steuerung	67
	Lokales Optimierungsverfahren	67
	Globales Optimierungsverfahren	70
	Vergleich der Optimierungsverfahren	72
5.1.3.	Schmutzfrachtbasierte Steuerung	73
	Einfache Mischungsrechnung	73
	Berücksichtigung der Absetzwirkung	75
5.1.4.	Steuerung durch indirekte Optimierung	77
	Software Lamatto	77
	Vergleich des ungesteuerten Referenzsystems	78
	Vergleich der Steuerungsqualität	79
5.2.	Fallbeispiel 2	80
5.2.1.	Systembeschreibung	80
5.2.2.	Vergleich der Optimierungsverfahren	83
5.2.3.	Variation des Evaluierungshorizonts	85
5.3.	Fallbeispiel 3	86
5.3.1.	Systembeschreibung	86
5.3.2.	Vergleich einfacher Berechnungsansätze für die Prozessmodellierung	88
5.3.3.	Vergleich der Optimierungsverfahren	91
6.Ergebnisdiskussion	93
6.1.	Steuerungsqualität	93
6.2.	Rechenzeit	94
6.3.	Bewertung	99
7.Zusammenfassung und Ausblick	102
	Literaturverzeichnis	105
	Anhang 1: Ergebnisanlagen für Fallbeispiel 2	
	Anhang 2: Ergebnisanlagen für Fallbeispiel 3	

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1: UNTERSCHIED ZWISCHEN REGELUNG (OBEN) UND STEUERUNG (UNTEN)	6
ABBILDUNG 2.2: UNGESTEUERTES SYSTEM (LINKS), LOKALE STEUERUNG (MITTE) UND VERBUNDSTEUERUNG (RECHTS), (DWA (2005), VERÄNDERT)	7
ABBILDUNG 2.3: PRINZIP DER OFFLINE-STEUERUNG (DWA (2005), VERÄNDERT)	8
ABBILDUNG 2.4: PRINZIP DER MODELLPRÄDIKTIVEN STEUERUNG (DWA (2005), VERÄNDERT)	10
ABBILDUNG 2.5: TEILSYSTEME BEI DER INTEGRIERTEN MODELLIERUNG EINSCHLIEßLICH STOFFPARAMETER	21
ABBILDUNG 2.6: DIREKTE PARAMETEROPTIMIERUNG MIT SIMULATIONSMODELLEN (SYRJAKOW, 2005)	23
ABBILDUNG 2.7: ABLAUSCHEMA BEI DER DIREKTEN PARAMETEROPTIMIERUNG	24
ABBILDUNG 2.8: KLASIFIZIERUNG VON OPTIMIERUNGSMETHODEN NACH SYRJAKOW (2005, VERÄNDERT)	25
ABBILDUNG 2.9: KLASIFIZIERUNG VON OPTIMIERUNGSGRITHMEN NACH SCHÜTZE ET AL. (2002A)	26
ABBILDUNG 2.10: ÜBERSICHT ÜBER DEN STAND DER TECHNIK UND DER WISSENSCHAFT IN DER MODELLPRÄDIKTIVEN STEUERUNG	39
ABBILDUNG 3.1: KLASISCHER REGELUNGSKREIS (OBEN) UND MODELLPRÄDIKTIVE STEUERUNG (UNTEN)	41
ABBILDUNG 3.2: ABLAUF UND TEILPROZESSE BEI DER MODELLPRÄDIKTIVEN STEUERUNG	43
ABBILDUNG 3.3: ZEITHORIZONTE DER MODELLPRÄDIKTIVEN STEUERUNG NACH RAUCH UND HARREMOES (1999, VERÄNDERT)	43
ABBILDUNG 3.4: ABLAUF BEI DER MODELLPRÄDIKTIVEN STEUERUNG	45
ABBILDUNG 4.1: AUFBAU DER SOFTWARE BLUEM.MPC	54
ABBILDUNG 4.2: EINGABEMASKEN FÜR BLUEM.MPC (LINKS) UND BLUEM.OPT (RECHTS)	55
ABBILDUNG 4.3: KOMPONENTEN UND ABLAUSCHEMA DER SOFTWARE BLUEM.MPC	56
ABBILDUNG 4.4: BLUEM.OPT - OPTIMIERUNGSVERFAHREN UND SIMULATOREN	57
ABBILDUNG 4.5: FLIEßSCHEMA DES ALGORITHMUS VON HOOKE & JEEVES (1961)	58
ABBILDUNG 4.6: FLIEßSCHEMA DER EVOLUTIONSSTRATEGIEN	61
ABBILDUNG 4.7: REPRÄSENTATION DES KANALNETZES IN SWMM5 (ROSSMAN (2006), VERÄNDERT)	62
ABBILDUNG 5.1: FALLBEISPIEL 1 – SYSTEMSKIZZE	65
ABBILDUNG 5.2: FALLBEISPIEL 1 – NIEDERSCHLÄGE UND ABFLUSSGANGLINIEN FÜR T01 (OBEN) UND T02 (UNTEN)	65
ABBILDUNG 5.3: FALLBEISPIEL 1 – VOLUMEN- UND ABFLUSSGANGLINIEN FÜR B01 (UNGESTEUERTES SYSTEM)	66
ABBILDUNG 5.4: FALLBEISPIEL 1 – VOLUMEN- UND ABFLUSSGANGLINIEN FÜR B02 (UNGESTEUERTES SYSTEM)	66
ABBILDUNG 5.5: FALLBEISPIEL 1 – GRAFISCHE DARSTELLUNG DER ZEITHORIZONTE	68
ABBILDUNG 5.6: FALLBEISPIEL 1 – VOLUMEN- UND ABFLUSSGANGLINIEN FÜR B01 (H&J-STEUERUNG)	69
ABBILDUNG 5.7: FALLBEISPIEL 1 – VOLUMEN- UND ABFLUSSGANGLINIEN FÜR B02 (H&J-STEUERUNG)	70
ABBILDUNG 5.8: FALLBEISPIEL 1 – GANGLINIEN FÜR REGENÜBERLAUFBECKEN B01 (PES-STEUERUNG)	71
ABBILDUNG 5.9: FALLBEISPIEL 1 – GANGLINIEN FÜR REGENÜBERLAUFBECKEN B02 (PES-STEUERUNG)	72
ABBILDUNG 5.10: FALLBEISPIEL 1 – ENTLASTUNGSABFLÜSSE (UNTEN) UND FRACHTSUMMEN (OBEN) FÜR BEIDE BECKEN BEI DER ABFLUSSBASIIERTEN STEUERUNG (H&J)	74
ABBILDUNG 5.11: FALLBEISPIEL 1 – ENTLASTUNGSABFLÜSSE (UNTEN) UND FRACHTSUMMEN (OBEN) FÜR BEIDE BECKEN BEI DER SCHMUTZFRACHTBASIIERTEN STEUERUNG (H&J)	75
ABBILDUNG 5.12: VERGLEICH ZWISCHEN INDIREKTER OPTIMIERUNG (LINKS) UND DIREKTER OPTIMIERUNG (RECHTS)	77
ABBILDUNG 5.13: VERGLEICH DER ABFLUSSGANGLINIEN ZWISCHEN SWMM UND LAMATTO (STARK VERGRÖßERTER AUSSCHNITT)	78
ABBILDUNG 5.14: FALLBEISPIEL 1 – MIT LAMATTO GENERIERTE GANGLINIEN FÜR B01 UND B02 (UNGESTEUERTES SYSTEM) ...	79
ABBILDUNG 5.15: FALLBEISPIEL 1 – MIT LAMATTO GENERIERTE GANGLINIEN FÜR B01 UND B02 (GESTEUERTES SYSTEM)	80
ABBILDUNG 5.16: FALLBEISPIEL 2 – SYSTEMSKIZZE	81
ABBILDUNG 5.17: FALLBEISPIEL 2 – REGENREIHE UND REPRÄSENTATIVE ZUFLUSSGANGLINIE	82
ABBILDUNG 5.18: FALLBEISPIEL 2 – GRAFISCHE DARSTELLUNG DER ZEITHORIZONTE, EVALUIERUNGSHORIZONT = 2 H	83
ABBILDUNG 5.19: FALLBEISPIEL 2 – GRAFISCHE DARSTELLUNG DER ZEITHORIZONTE, EVALUIERUNGSHORIZONT = 5 H	85
ABBILDUNG 5.20: FALLBEISPIEL 3 – SYSTEMSKIZZE	87
ABBILDUNG 5.21: FALLBEISPIEL 3 – LÄNGSSCHNITT DES ZULAUFKANALS ZU BKLA UNTER ANSATZ DER DYNAMISCHEN WELLENBERECHNUNG	89

ABBILDUNG 5.22: FALLBEISPIEL 3 – LÄNGSSCHNITT DES ZULAUFKANALS ZU BN01 UNTER ANSATZ DER KINEMATISCHEN WELLENBERECHNUNG	89
ABBILDUNG 5.23: FALLBEISPIEL 3 – VERGLEICH DER ENTLASTUNGSABFLÜSSE BEI BKLA ZWISCHEN DYNAMISCHER UND KINEMATISCHER WELLE	90
ABBILDUNG 5.24: FALLBEISPIEL 3 – GRAFISCHE DARSTELLUNG DER ZEITHORIZONTE	91
ABBILDUNG 6.1: RECHENZEITEN FÜR FALLBEISPIEL 1	96
ABBILDUNG 6.2: RECHENZEITEN FÜR FALLBEISPIEL 2 (EVALUIERUNGSHORIZONT: 2 H)	97
ABBILDUNG 6.3: RECHENZEITEN FÜR FALLBEISPIEL 2 (EVALUIERUNGSHORIZONT: 5 H)	98
ABBILDUNG 6.4: RECHENZEITEN FÜR FALLBEISPIEL 3	99

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1: VOR- UND NACHTEILE VON HYDRODYNAMISCHEN UND HYDROLOGISCHEN BERECHNUNGSVERFAHREN	17
TABELLE 2.2: VOR- UND NACHTEIL VON LOKALEN UND GLOBALEN OPTIMIERUNGSGRUNDGESETZEN BEI DER DIREKTEN PARAMETEROPTIMIERUNG (SYRJAKOW, 2005)	28
TABELLE 5.1: FALLBEISPIEL 1 - VERGLEICH DER ENTLASTUNGSABFLÜSSE ZWISCHEN REFERENZSYSTEM UND H&J-STEUERUNG ...	68
TABELLE 5.2: FALLBEISPIEL 1 - VERGLEICH DER ENTLASTUNGSABFLÜSSE ZWISCHEN UNGESTEUERTEM SYSTEM UND PES- STEUERUNG	71
TABELLE 5.3: FALLBEISPIEL 1 – VERGLEICH DER ENTLASTUNGSVOLUMINA DES UNGESTEUERTEN SYSTEMS MIT LOKALEM UND GLOBALEM OPTIMIERUNGSGRUNDGESETZ	73
TABELLE 5.4: FALLBEISPIEL 1 – ERGEBNISSE DER SCHMUTZFRACHTBASIERTE STEUERUNG BEI EINFACHER MISCHUNGSRECHNUNG	73
TABELLE 5.5: FALLBEISPIEL 1 – ERGEBNISSE DER SCHMUTZFRACHTBASIERTE STEUERUNGEN MIT ABSETZWIRKUNGEN	76
TABELLE 5.6: FALLBEISPIEL 1 – VERGLEICH DER ENTLASTUNGSVOLUMINA ZWISCHEN BLUEM.MPC UND LAMATTO (UNGESTEUERTES SYSTEM)	78
TABELLE 5.7: FALLBEISPIEL 1 – VERGLEICH DER BERECHNETEN ENTLASTUNGSVOLUMINA ZWISCHEN BLUEM.MPC UND LAMATTO	79
TABELLE 5.8: FALLBEISPIEL 2 – KENNGRÖßEN DER REGENÜBERLAUFBECKEN	82
TABELLE 5.9: FALLBEISPIEL 2 – ENTLASTUNGSVOLUMINA DES UNGESTEUERTEN SYSTEMS	83
TABELLE 5.10: FALLBEISPIEL 2 – VERGLEICH DER ENTLASTUNGSVOLUMINA ZWISCHEN UNGESTEUERTEM UND GESTEUERTEM SYSTEM, EVALUIERUNGSHORIZONT = 2 H	84
TABELLE 5.11: FALLBEISPIEL 2 – VERGLEICH DER ENTLASTUNGSVOLUMINA ZWISCHEN UNGESTEUERTEM UND GESTEUERTEM SYSTEM, EVALUIERUNGSHORIZONT = 5 H	86
TABELLE 5.12: FALLBEISPIEL 3 – KENNGRÖßEN DER REGENÜBERLAUFBECKEN	88
TABELLE 5.13: FALLBEISPIEL 3 – ENTLASTUNGSVOLUMINA DES UNGESTEUERTEN SYSTEMS	88
TABELLE 5.14: FALLBEISPIEL 3 – VERGLEICH DER ENTLASTUNGSABFLÜSSE DES UNGESTEUERTEN SYSTEMS UNTER ANSATZ VON DYNAMISCHER UND KINEMATISCHER WELLE	90
TABELLE 5.15: FALLBEISPIEL 3 – VERGLEICH DER ENTLASTUNGSABFLÜSSE ZWISCHEN UNGESTEUERTEM UND GESTEUERTEM SYSTEM	92
TABELLE 6.1: ZUSAMMENFASSUNG DER MIT BLUEM.MPC BERECHNETEN ENTLASTUNGSVOLUMINA UND –FRACHTEN FÜR ALLE DREI FALLBEISPIELE	93



1. Einleitung

Unter Abflusssteuerung im Kanalnetz versteht man den planmäßigen Eingriff in Abfluss-, Speicherungs- und Entlastungsvorgänge innerhalb eines Kanalisationssystems mit der Absicht, das vorhandene Kanal- und Beckenvolumen optimal zu nutzen und somit Gewässerbelastungen zu reduzieren. Die Abflusssteuerung stellt eine Alternative zu herkömmlichen Sanierungsverfahren dar. Bei diesen konventionellen Methoden handelt es sich in der Regel um den Bau neuer Rückhalteräume, die Vergrößerung vorhandener Haltungsnennweiten oder um dezentrale Maßnahmen zur Verminderung der Regenwassereinleitungen wie Versickerungen, Entsiegelungen oder Entkoppelungen. Diese Maßnahmen sind in der Regel kostenintensiv und häufig aus bautechnischen und besitzrechtlichen Gründen nur unter erheblichem Aufwand umzusetzen. Mit der Abflusssteuerung steht dagegen „eine intelligente Art der Sanierung“ (Fuchs, 2002) zur Verfügung. Es handelt sich im Gegensatz zu den herkömmlichen (passiven) Maßnahmen um eine aktive Bewirtschaftung des Kanalnetzes. Es ist ein dynamisches Konzept zur optimalen Ausnutzung des vorhandenen Entwässerungssystems, das statisch dimensioniert wurde.

Bei entsprechendem Steuerungspotenzial kann die Sanierung von Mischwassernetzen mit Hilfe der Abflusssteuerung zu deutlich geringeren Investitionskosten führen. Da seitens der Kommunen auf Grund finanzieller Zwänge zukünftig verstärkt kostensparende Technologien gefordert werden, erwarten Experten sogar, dass die Kanalnetzbewirtschaftung bei dem derzeit zu beobachtenden Entwicklungsfortschritt zur Regel der Technik wird (Schilling, 2002). Sie begründen dies folgendermaßen:

- Im Mischverfahren betriebene Kanalnetze verursachen Gewässerverunreinigungen, die nicht vernachlässigbar sind. In Deutschland wurden seit Einführung des ATV-Arbeitsblattes A 128 Tausende von Regenüberlaufbecken gebaut und die Auswirkungen der Mischwasserentlastungen werden mit besserer Kläranlagenleistung zwar nicht gravierender, aber deutlicher.
- Es ist ausgesprochen teuer, Mischwasserüberläufe und hydraulische Überlastungen mit konventionellen Mitteln, wie dem Bau zusätzlicher Sammler und Becken, zu verringern. Dies gilt insbesondere, wenn „der letzte Kubikmeter“ eines Regenbeckens nur wenige Male pro Jahr aktiviert wird.
- Vermutlich gibt es kein wasserwirtschaftliches System, in dem die Diskrepanz zwischen Entwurfs- und Betriebsbedingungen so groß ist wie bei Mischkanalisationen. Während mehr als 90 % der Zeit werden Mischwassernetze mit weniger als 10 % ihrer Transportkapazität beaufschlagt. Diese Diskrepanz eröffnet einen Handlungsspielraum, der mit Hilfe der Kanalnetzbewirtschaftung nutzbar gemacht werden kann.

Neben den investiven Vorteilen lässt die Abflusssteuerung auch einen betrieblichen Vorteil gegenüber ungesteuerten Netzen erwarten (Weyand et al., 2000). Der betriebliche Nutzen resultiert vor allem aus der Kombination vieler Vorteile: Seltenere Überlastungen, verminderte Entlastungsmengen, ausgeglichener Pumpenbetrieb, verminderter Reinigungsaufwand, bessere Datengrundlagen für künftige Planungen und vor allem die Informationen im Hinblick auf Überwachung und Beweissicherung. Erbe et al. (2009)

sehen darüber hinaus auch eine bessere Anpassbarkeit an wasserwirtschaftliche Veränderungen und zukünftig schärfere wasserrechtliche Anforderungen.

Neben vielen Befürwortern der Abflusssteuerung gibt es jedoch auch Skeptiker. Diese kommen zumeist aus dem Abwasserbetrieb und haben schlechte Erfahrungen mit der für die Abflusssteuerung unerlässlichen Messtechnik gemacht. Diese ist, vor allem bei den vorliegenden widrigen Umständen im Kanal, besonders anspruchsvoll zu gestalten und damit auch sehr fehleranfällig. Dass viele Akteure die Vorteile einer Abflusssteuerung propagieren, ohne darauf hinzuweisen, dass nicht alle Kanalnetze oder Entwässerungssysteme ein signifikantes Steuerungspotenzial besitzen, ist vor diesem Hintergrund sicherlich nicht förderlich.

Insgesamt zeigt jedoch eine große Anzahl von erfolgreichen Umsetzungen, dass die Abflusssteuerung in Systemen mit dem entsprechenden Steuerungspotenzial erfolgreich einsetzbar ist und sie als Variante bei der Sanierung von Entwässerungssystemen nicht von vornerein ausgeschlossen werden sollte.

1.1. Veranlassung

In der Entwässerungsplanung sind derzeit die folgenden Entwicklungen zu beobachten: Einerseits werden, trotz enormer Erfolge bei der Verminderung der Belastungen natürlicher Gewässer durch Mischwasserentlastungen, die Anforderungen an die Planung und den Betrieb von Entwässerungssystemen durch rechtliche Vorgaben stetig höher. Auf der anderen Seite schaffen fortschreitende technische Verbesserungen, vor allem von Verfahren zur Abfluss- und Stoffmessung im Kanal und im Gewässer sowie in der Computertechnologie, Möglichkeiten und Randbedingungen, zukünftig aufwändige Verfahren in Planung und Betrieb einzusetzen. Vor dem Hintergrund der vielfach bestehenden finanziellen Zwänge ergibt sich eine Situation, bei der dem Potenzial der technischen Entwicklungen einerseits höhere Anforderungen an den Betrieb der Entwässerungssysteme und andererseits der Bedarf an intelligenten, kostensparenden Lösungen gegenüber stehen. Mit der Abflusssteuerung steht ein für diese Situation prädestiniertes Verfahren zu Verfügung, das bereits erfolgreich eingesetzt wird, dessen Potenzial jedoch noch nicht ausgeschöpft ist.

1.2. Zielsetzung

Im Rahmen der Arbeit werden die Einsatzmöglichkeiten der modellprädiktiven Steuerung in der Entwässerungsplanung untersucht, wobei insbesondere die Verwendung von hydrodynamischen Kanalnetzmodellen sowie die Leistungsfähigkeit von lokalen und globalen Optimierungsverfahren im Mittelpunkt stehen. Der Einsatz von hydrodynamischen Berechnungsansätzen ermöglicht eine genauere Abfluss- und Stoffstrommodellierung gegenüber einfacheren hydrologischen Ansätzen und führt somit zu gesicherteren Aussagen hinsichtlich der formulierten Steuerungsziele. Durch die gegenüberstellende Anwendung von lokalen und globalen Optimierungsverfahren soll untersucht werden, ob

die globalen Algorithmen in der Lage sind, bessere Steuerungsentscheidungen als die lokalen Algorithmen zu finden.

Voraussetzung für diese Untersuchungen ist ein Werkzeug, mit dem modellprädiktive Steuerungen auf der Basis von Computersimulationen durchgeführt werden können. Da das Verfahren in der Entwässerungsplanung bislang nur selten eingesetzt wird, existieren entsprechend wenige derartige Simulationswerkzeuge. Eine Software, die für die Beantwortung der zu untersuchenden Fragen geeignet ist, existiert nicht. Daher muss zunächst analysiert werden, wie ein solches Werkzeug aufgebaut sein soll und was es genau zu leisten hat.

Die Software soll frei verfügbar und von Ingenieuren mit entsprechenden Grundkenntnissen in der Kanalnetzmodellierung und der Optimierung mit angemessenem Aufwand anwendbar sein. Da die Verwendung von Simulationsmodellen, die von Kanalnetzbetreibern bereitwillig akzeptiert werden, ein wesentlicher Schlüssel für die Implementierung von Steuerungssystemen ist (Labadie, 2004), soll möglichst bereits existierende Software zum Einsatz kommen. Somit entsteht nicht nur ein Werkzeug, das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wird, sondern darüber hinaus eine Software, die ohne weiteres auf andere Problemstellungen übertragbar ist und sich somit für die Überprüfung und Quantifizierung des Steuerungspotenzials von Entwässerungssystemen eingesetzt werden kann.

Steuerungspotenzial liegt in vielen Fällen in flachen Kanalnetzen vor, in denen der Abfluss durch Trägheits- und Beschleunigungsprozesse geprägt ist. Für die möglichst genaue Abflussberechnung ist daher die Verwendung von hydrodynamischen Modellen erforderlich. Diese basieren auf den St.-Venant'schen-Gleichungen, die, im Gegensatz zu den einfacheren hydrologischen Berechnungsverfahren, Trägheits- und Beschleunigungsprozesse berücksichtigen. Auf Grund der komplexeren mathematischen Ansätze erfordern hydrodynamische Modelle allerdings längere Rechenzeiten und darüber hinaus können numerische Instabilitäten auftreten. Es muss daher geprüft werden, ob die modellprädiktive Steuerung auf der Basis von hydrodynamischen Modellen prinzipiell mit stabilen Berechnungsergebnissen möglich ist. Ebenso gilt es zu untersuchen, welche Möglichkeiten bestehen, die zeitlichen Einschränkungen zu überwinden, die sich bei der modellprädiktiven Steuerung aus der Anforderung ergibt, innerhalb eines Kontrollzeitschritts eine optimale Steuerungsentscheidung zu finden.

Die bestehenden Werkzeuge für die modellprädiktive Steuerung kennzeichnen sich dadurch, dass für die Prozessmodellierung vereinfachte Abflussberechnungsansätze verwendet werden, so dass für die Berechnung der Steuerungsentscheidungen die lineare Optimierung oder lokale Optimierungsalgorithmen zum Einsatz kommen können. Einzelne Ausnahmen existieren zwar (z.B. Zunic (1991)), aber auch diese beschränken die Einsatzmöglichkeiten auf ein einziges Optimierungsverfahren. Gerade auf dem Gebiet der Kanalnetzsteuerung stellen allerdings einige Autoren (z.B. Rohlffing (1994), Rauch und Harremoes (1999), Butler und Schütze (2005)) die These auf, dass nur globale Optimierungsverfahren einen optimalen Steuerungsbetrieb gewährleisten können, da die lokalen Algorithmen unter Umständen nur suboptimale Ergebnisse liefern. Um diese Hypothese zu überprüfen, ist eine flexible Software erforderlich, welche die Verwendung

verschiedener Optimierungsalgorithmen und damit einen Vergleich ihrer Leistungsfähigkeit ermöglicht.

Die Arbeit befasst sich ausschließlich mit konzeptionellen Aspekten, d.h. es werden Methoden und Werkzeuge entwickelt, die an Hand von Simulationsstudien überprüft werden. Obwohl die entwickelten Werkzeuge so angelegt sind, dass eine Umsetzung in die Praxis generell angestrebt wird, sind Anwendungen an realen Systemen oder in großtechnischen Versuchen im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen. Die Untersuchungen basieren daher auf idealisierten Systemen, bei denen davon ausgegangen wird, dass die Simulationsmodelle die Realität perfekt abbilden. Da diese Annahmen in der Realität nicht zutreffen, werden üblicherweise Verfahren zum Abgleich der Modellrechnungen mit gemessenen Werten eingesetzt. Auf diese Verfahren wird hier nicht weiter eingegangen, weitergehende Informationen hierzu finden sich z.B. bei Methot und Pleau (1997), Cassar (2000), Pleau et al. (2001) oder Brdys et al. (2008). Für die oben formulierten Zielsetzungen der Arbeit ist die zugrunde liegende Annahme eines idealen Systems ohne Bedeutung.

Am Ende der Arbeit soll eine Software für die modellprädiktive Steuerung mit hydrodynamischen Modellen zur Verfügung stehen, die hinsichtlich der einsetzbaren Optimierungsalgorithmen flexibel ist. Mit dieser sollen einerseits die Möglichkeiten zur Reduzierung der Rechenzeiten abgeschätzt werden und andererseits potenzielle Unterschiede zwischen lokalen und globalen Optimierungsalgorithmen untersucht werden.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit der Einleitung in Kapitel 1, in der die Veranlassung und die Zielsetzung beschrieben werden. In Kapitel 2 wird zunächst ein allgemeiner Überblick über die Abflusssteuerung in urbanen Entwässerungssystemen gegeben. Hierbei stehen theoretische Konzepte und Methoden im Mittelpunkt: sowohl für die Steuerung selbst als auch für die Prozessmodellierung und die Optimierung; beides Aufgaben, die bei der modellprädiktiven Steuerung unabdingbar sind. Das Kapitel schließt mit dem Stand der Technik und dem Forschungsbedarf. Die Darstellung des Stands der Wissenschaft geht neben der modellprädiktiven Steuerung explizit auf das Thema immissionsorientierte Steuerungen ein. Dies ist darin begründet, dass das Thema ebenso aktuell ist wie die modellprädiktive Steuerung, dass sich beide Aufgaben aber nicht gegenseitig ausschließen. Umsetzungen von immissionsorientierten Steuerungen auf der Basis von modellprädiktiven Steuerungsalgorithmen sind aber derzeit noch unrealistisch, da die erforderlichen Rechenleistungen auf absehbarer Zeit noch nicht zur Verfügung stehen.

In Kapitel 3 wird das Verfahren der modellprädiktiven Steuerung detailliert analysiert und die Anforderungen herausgearbeitet, die insbesondere für den Einsatz in der Abflusssteuerung relevant sind. Ein maßgeblicher Aspekt ist hierbei das (dominante) Problem aller modellprädiktiven Abflusssteuerungen: die Rechenzeit. Da aufgrund der fortwährenden Verbesserungen in der Computertechnik und den damit verbundenen schnelleren Rechenleistungen keine abschließende Aussage über die potenzielle Größe von steuerbaren Entwässerungssystemen getroffen werden, werden die prinzipiellen Möglichkeiten zur Beschleunigung der Modellierung ausführlich betrachtet.

In Kapitel 4 wird das im Rahmen der Arbeit entwickelte Werkzeug zur modellprädiktiven Steuerung mit hydrodynamischer Abflussberechnung beschrieben, das für die Berechnung der Fallbeispiele eingesetzt wurde, die in Kapitel 5 dokumentiert sind. Insgesamt werden hier drei Fallbeispiele untersucht.

Beim ersten Fallbeispiel handelt es sich um das einfache Kanalnetz des DWA-Kanalnetzdemostrators (Schütze et al., 2007). An Hand dieses Systems wird zunächst die grundsätzliche Funktionalität der entwickelten Software demonstriert. Darüber hinaus dient das System auch für den Vergleich mit einer weiteren Software, die im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekts „Diskret-kontinuierliche Optimierung komplexer dynamischer Wasserver- und -entsorgungssysteme (Odysseus)¹“ entwickelt wurde. Odysseus wurde unter der Prämisse initiiert, dass aktuelle Erkenntnisse und Entwicklungen in der Mathematik bei der Bearbeitung von Ingenieuraufgaben häufig unberücksichtigt bleiben. Ziel des Projektes war es, die fehlende Abstimmung und Kooperation zwischen Mathematik und Ingenieurwissenschaften zu überwinden. Im Teilprojekt „Echtzeitoptimierung in der Wasserentsorgung“, in dem das Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung der TU Darmstadt und der Lehrstuhl für Angewandte Mathematik II der Universität Erlangen-Nürnberg involviert waren, wurden aktuelle Methoden für den Einsatz in der modellprädiktiven Steuerung untersucht (BMBF, 2010). In diesem Zusammenhang wurde neben der vom Autor entwickelten (und in Kapitel 4 beschriebenen) Software durch den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik II eine weitere Software entwickelt, die entsprechend der Aufgabenstellung aktuellste mathematische Erkenntnisse implementiert. Die vergleichende Anwendung beider Softwarewerkzeuge erlaubt eine umfassende Abschätzung der Möglichkeiten zur Überwindung der hohen Anforderungen an die Rechenzeiten bei der modellprädiktiven Steuerung.

Für das zweite Fallbeispiel wird das Entwässerungssystem einer Kleinstadt verwendet, in dem Knoten, Haltungen und Teileinzugsgebiete zu einem Grobnetz aggregiert wurden und die Berechnungen im operationellen System durchgeführt werden. Das System des dritten Fallbeispiels wurde aus dem des zweiten Fallbeispiels abgeleitet. Beckenvolumina und Neigungen der Transportsammler wurden dafür so verändert, dass ein für Steuerungen prädestiniertes Entwässerungssystem mit einem großen Speichervolumen in den Transportsammlern entstand. In beiden Fallbeispielen werden verschiedene Szenarien gerechnet, um ein möglichst breites Spektrum an Lastfällen zu bekommen, an Hand derer der in Kapitel 2 formulierte Forschungsbedarf abgearbeitet werden soll.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse zusammengefasst und analysiert. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Steuerungsqualität und die Rechenzeiten. Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und dem Ausblick in Kapitel 7.

¹ Das Projekt Odysseus wurde im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts „Mathematik für Innovationen in Industrie und Dienstleistung“ durchgeführt (Förderkennzeichen: 03MAPAK1). Der ungewohnte Begriff „Wasserentsorgung“ wurde durch die Kollegen der mathematischen Lehrstühle geprägt.

2. Steuerung von urbanen Entwässerungssystemen

Die Abflusssteuerung in Entwässerungssystemen ist in jeder Hinsicht ein komplexer Vorgang, sowohl aufgrund der hohen praktischen Anforderungen als auch hinsichtlich der konzeptionellen Ansätze in der Planung. In diesem Kapitel werden die grundlegenden Konzepte der Steuerungstypen, -algorithmen und -ziele sowie Verfahren zur Ermittlung des Steuerungspotenzials beschrieben. Abschließend werden aktuelle Steuerungssysteme aus der Praxis und die wesentlichen Forschungsarbeiten dargestellt, die den Stand der Technik und der Wissenschaft dokumentieren.

2.1. Steuerungskonzepte und -methoden

Während in der deutschen Sprache zwischen Regelung und Steuerung unterschieden wird, wird im englischen Sprachgebrauch für beide Methoden der Begriff „control“ verwendet. Eine Abgrenzung erfolgt im Englischen durch die Begriffe „feed-forward control“ (Steuerung) und „feedback control“ (Regelung). Der Unterschied liegt in der Behandlung der Ausgangsgröße. Bei einem klassischen Regelkreis wird die Ausgangsgröße durch Rückkopplung in die Regelung einbezogen, während die Ausgangsgröße bei der Steuerung nicht kontrolliert wird (siehe Abbildung 2.1).

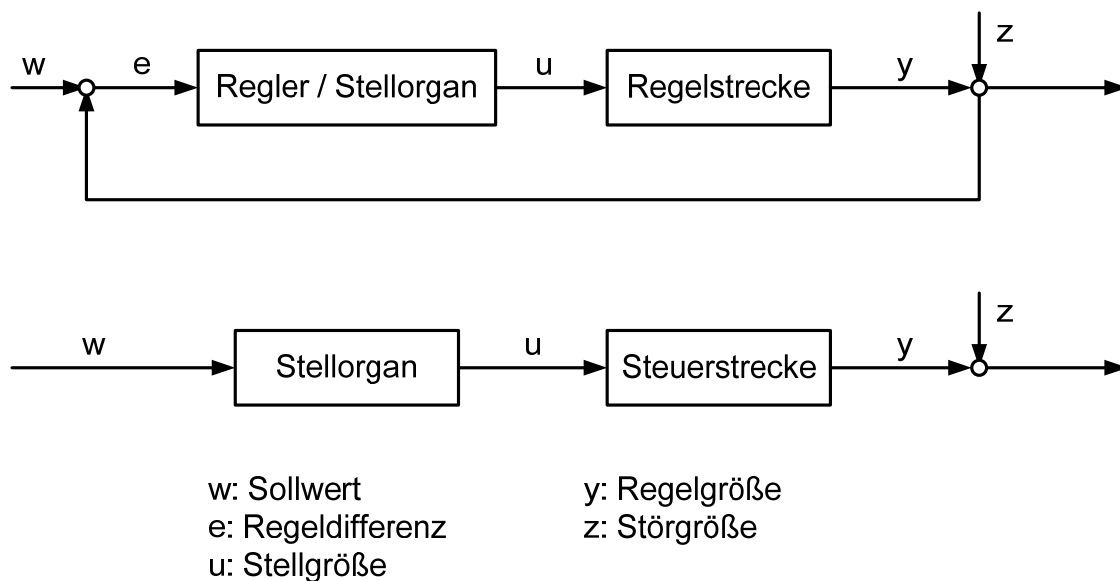


Abbildung 2.1: Unterschied zwischen Regelung (oben) und Steuerung (unten)

2.1.1. Steuerungstypen

Grundsätzlich unterscheidet man lokale Steuerungen und Verbundsteuerungen (siehe Abbildung 2.2). Mit lokaler Steuerung wird die Steuerung lediglich eines Stellorgans unter Einbeziehung von Messdaten aus der unmittelbaren Umgebung bezeichnet. Lokale Steuerungssysteme kommen praktisch in allen größeren Entwässerungssystemen zum Einsatz – z.B. als Pumpen, deren Abgabemengen in Abhängigkeit des Wasserstandes im

Pumpensumpf reguliert wird. Dem gegenüber steht die Verbundsteuerung, bei der mehrere Mess- und/oder Stellorgane koordiniert betrieben werden, so dass eine Steuerungsentscheidung ausgehend vom Gesamtzustand des Entwässerungssystems getroffen werden kann. Vor dem Hintergrund, dass bei der Kanalnetzsteuerung Entwässerungsnetze mit mehreren Speicherbauwerken untersucht werden, sind im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Verbundsysteme von Interesse.

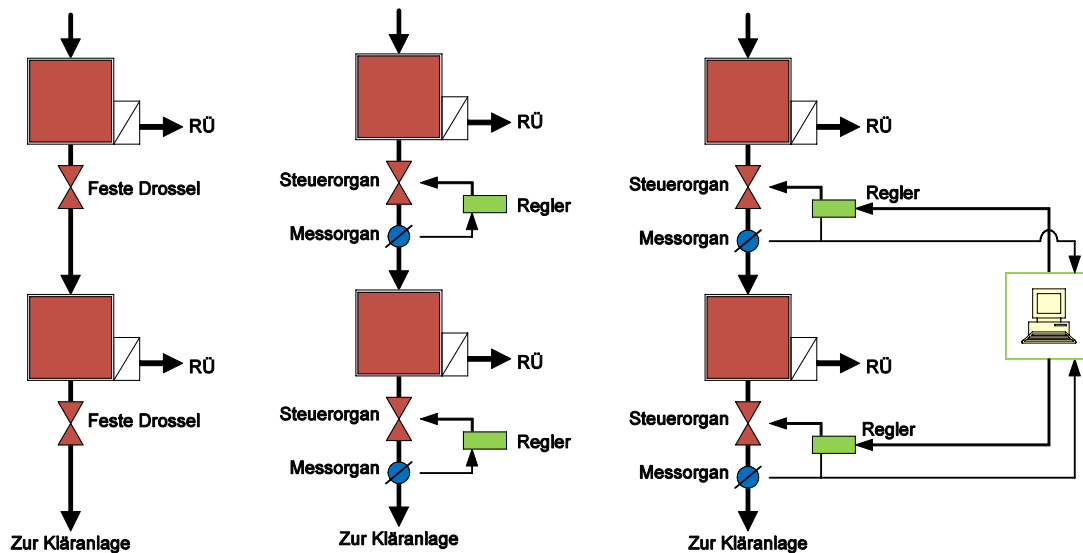


Abbildung 2.2: Ungesteuertes System (links), lokale Steuerung (Mitte) und Verbundsteuerung (rechts), (DWA (2005), verändert)

Das Merkblatt DWA-M 180 (DWA, 2005) unterscheidet neben der lokalen und der Verbundsteuerung noch die integrierte Steuerung, bei der für die Festlegung der Steuerungsentscheidung zusätzlich Zustandsinformationen aus der Kläranlage und / oder dem Gewässer einbezogen werden. Letztlich handelt es sich dabei aber ebenfalls um eine Verbundsteuerung. Eine vertiefte Betrachtung der integrierten Steuerung wird in Kap. 2.4.1 gegeben.

2.1.2. Steuerungsalgorithmen

Bei den Steuerungsalgorithmen werden grundsätzlich zwei Methoden unterschieden. Die Ermittlung der Steuerbefehle erfolgt hierbei entweder in der Planungsphase oder im laufenden Betrieb. Von Labadie et al. (1974) wurden hierfür die Begriffe „off-line control“ (Offline-Steuerung) und „on-line control“ (Online-Steuerung) eingeführt.

Offline-Steuerung

Offline-Steuerungen werden solche Systeme genannt, die bereits ermittelte Steuerungsentscheidungen als Betriebsregeln vorhalten und diese im laufenden Betrieb ohne zeitliche Verzögerung direkt abrufen (siehe Abbildung 2.3).

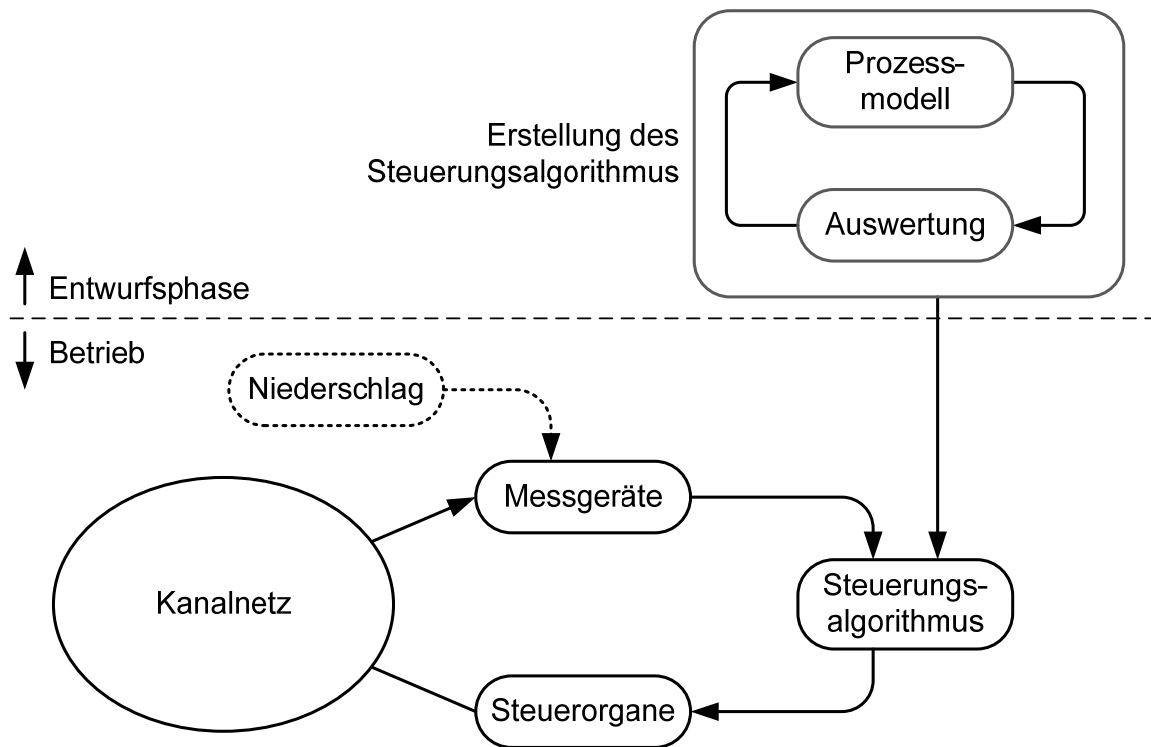


Abbildung 2.3: Prinzip der Offline-Steuerung (DWA (2005), verändert)

Die Betriebsregeln können auf verschiedene Arten ermittelt werden, von einfachen Verfahren, die auf der Erfahrung des Betriebspersonals beruhen, bis hin zu mathematischen Optimierungsverfahren (z.B. Schütze et al. (2001)) sind verschiedene Komplexitätsstufen möglich.

Nach Schilling (1990), Meßmer und Papageorgiou (1996) sowie DWA (2005) sind bei der Offline-Steuerung die folgenden Steuerungsalgorithmen möglich:

- Entscheidungsmatrizen, in denen für alle möglichen Zustandskombinationen Steuerungsentscheidungen vorgehalten werden.
- Entscheidungsbäume, bei denen es sich um eine Reihe von Wenn-dann-Regelsätzen handelt. Sie lassen sich mit einem wesentlich geringeren Aufwand speichern als Entscheidungsmatrizen.
- Fuzzy-Regelsysteme, die letztlich ebenfalls auf Basis von Entscheidungsbäumen Steuerungsentscheidungen treffen, bei denen allerdings eine „weichere“ Formulierung der Zustandsinformationen möglich ist.

-
- Mehrgrößenreglerkonzepte, bei denen auf Basis von Messwerten mittels einfacher mathematischer Operationen Steuerentscheidungen berechnet werden.
 - Lernendes Expertensystem, welches die vorab eingegebene Steuerungsvorschriften fortlaufend evaluiert und die Steuerungsvorschriften verändert.

Theoretisch ist auch eine Steuerung durch das Betriebspersonal, entweder als manuelle oder überwachte Steuerung, denkbar. Durch Simulationsmodelle können Effekte von Steuerungseingriffen vorab berechnet und grafisch dargestellt werden, um verschiedene Strategien zu testen und die günstigste auszusuchen. Aufgrund der damit verbundenen Subjektivität, d.h. der Abhängigkeit von der Erfahrung des Betriebspersonals, das zum kritischen Zeitpunkt zur Verfügung stehen muss, ist dieses Verfahren allerdings unpraktisch.

In fast allen Fällen ist für das Aufstellen der Regelbasis ein Simulationsmodell erforderlich. Die Regelerstellung und die Verifikation basieren auf Langzeitsimulationen, um ein möglichst breites Spektrum an potenziellen Lastfällen abzudecken. Da die Simulationen in der Planungsphase durchgeführt werden unterliegen sie keinem Zeitdruck wie bei der modellprädiktiven Steuerung, so dass hierfür theoretisch auch detaillierte Modelle (z.B. hydrodynamische Modelle) eingesetzt werden können. Die Simulationen unterliegen somit auch keinen Einschränkungen hinsichtlich des Evaluierungshorizonts, so dass auch Langzeiteffekte für die Bewertung der Steuerungsziele berücksichtigt werden können (Schütze et al., 2002a).

Online-Steuerung

Bei der Online-Steuerung werden die Regeln während des Betriebs („online“) ermittelt (siehe Abbildung 2.4). Zum Einsatz kommen hier praktisch ausschließlich mathematische Optimierungsverfahren, für die entsprechende Zielfunktionen formuliert werden müssen. In DWA (2005) wird dieses Verfahren daher als „Steuerung auf der Basis der Formulierung eines Optimierungsproblems“ bezeichnet. Wesentlicher Bestandteil bei der Online-Steuerung ist die Berücksichtigung von prognostizierten Niederschlägen bzw. Zuflüssen zum Kanalnetz, wodurch die Methode dem aus der Regelungstechnik bekannten Prinzip der modellprädiktiven Regelung entspricht.

In amerikanischen Fachzeitschriften wurde das Verfahren erstmals in den 70er Jahren unter dem Begriff „Automatic Control (of Sewer Networks)“ erwähnt (Gibbs et al. (1972), Brandstetter et al. (1973)). Papageorgiou (1985) prägte später den Begriff „Optimal Control (of Sewer Networks)“ und Gelormino und Ricker (1994) führten schließlich die Bezeichnung „Model Predictive Control (of Sewer Networks)“ ein. Beide Begriffe haben sich auch im deutschen Sprachraum durchgesetzt, so dass mittlerweile von „Optimaler Echtzeitsteuerung“ oder von „modellprädiktiver Steuerung“ gesprochen wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff „modellprädiktive Steuerung“ verwendet. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens wird in Kapitel 3 gegeben.

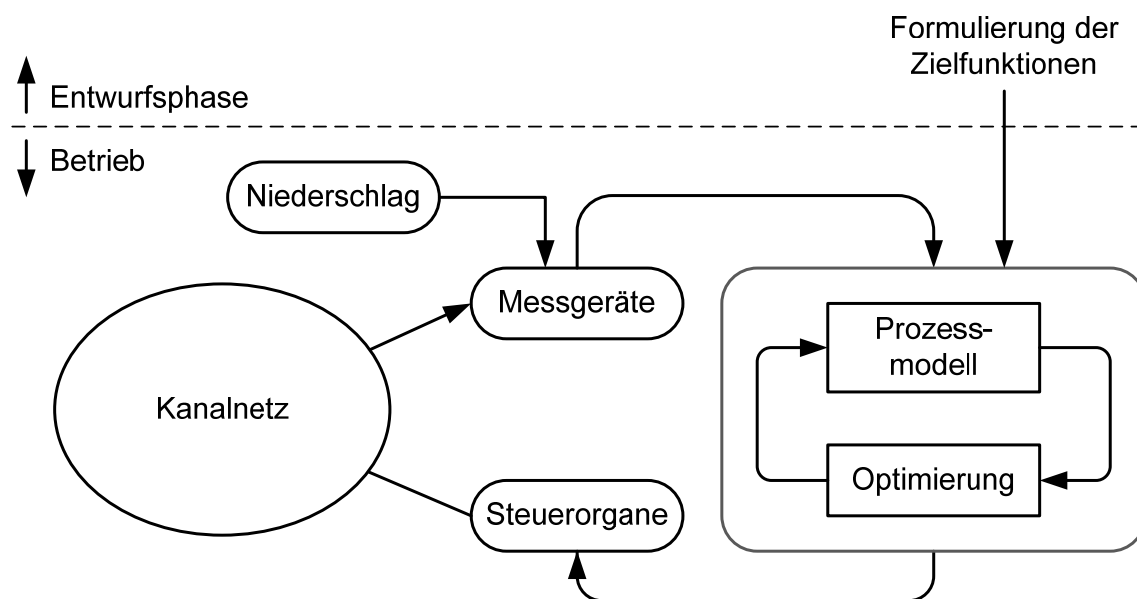


Abbildung 2.4: Prinzip der modellprädiktiven Steuerung (DWA (2005), verändert)

Vergleich der beiden Steuerungsalgorithmen

Dass sich die beiden Steuerungsalgorithmen nicht immer einfach voneinander abgrenzen lassen, wird an der Berücksichtigung von Niederschlags- bzw. Abflussvorhersagen deutlich, die bei der modellprädiktiven Steuerung obligatorisch ist, bei der Offline-Steuerung allerdings auch zum Einsatz kommen kann. Je nachdem, ob Vorhersagen berücksichtigt werden, werden die Systeme als reaktive (ohne Berücksichtigung von Vorhersagen) oder adaptive Steuerung (mit Berücksichtigung von Vorhersagen) bezeichnet. Ein Beispiel für ein adaptives Steuerungssystem liefern Khelil et al. (1994), die mit Hilfe von Niederschlags-Abfluss-Berechnungen Einleitungsabflüsse in das Kanalnetz ermitteln und diese in der Regelbasis berücksichtigen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Niederschlagsprognosen in die Berechnungen einzubeziehen ((Carstensen et al., 1996), (Yuan et al., 1999), (Pfister und Cassar, 1999)). Untersuchungen zur Berücksichtigung von Regenvorhersagen mit Radarinformationen wurden z.B. von Cassar und Redder (1997) durchgeführt. Einen Schritt weiter gehen sogar noch Amdisen et al. (1994), die in ihre Regelbasis die Ergebnisse einer zur Laufzeit durchzuführenden numerischen Simulation berücksichtigen. Sie grenzen sich somit nur noch dadurch von der modellprädiktiven Steuerung ab, dass sie die Steuerungsentscheidungen bereits vorab ermittelt haben.

Bei der Sichtung der Literatur fällt auf, dass von den Autoren jeweils die Vorteile des einen und die Nachteile des anderen Algorithmus als Argument für die Entwicklung des eigenen Ansatzes verwendet werden. Letztlich gilt, dass bei entsprechendem Steuerungspotenzial beide Algorithmen erfolgreich sein können und dass der gewählte Ansatz zum betrachteten Entwässerungssystem und zu den vorliegenden Randbedingungen passen muss.

Der offensichtlichste Unterschied zwischen beiden Methoden ist die bei online-Systemen erforderliche Rechenzeit für die Ermittlung der Steuerungsentscheidungen, die bei offline-Systemen praktisch nicht anfällt, da hier die Entscheidungen schon in der Planungsphase

ermittelt wurden. In wie fern sich die Rechenkapazitäten in Zukunft entwickeln, d.h. ob Computer so schnell werden, dass modellprädiktive Steuerungen ohne Einschränkungen möglich sind, kann und soll an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Unabhängig von diesem strukturbedingten Unterschied der Rechenzeit bestehen die folgenden Vor- und Nachteile für die beiden Algorithmen:

Für regelbasierte Offline-Steuerungen gilt, dass die ermittelten Entscheidungen durch den Anwender nachvollzogen werden können, solange die Regelbasis nicht allzu komplex ist. Das Finden der geeigneten Entscheidungsregeln und ihre Parametrisierung bleiben allerdings weitgehend der Intuition und Vorstellungskraft des Ingenieurs überlassen. Bei komplexen Netzen stößt diese zunächst leicht zu beschreibende Vorgehensweise sehr schnell an ihre Grenzen. Insbesondere bei der Berücksichtigung von Ausfällen einzelner Steuereinheiten erreicht die Zahl der nötigen Regeln schnell ein unüberschaubares Maß (Meßmer und Papageorgiou, 1996). Dem Vorteil, dass die Regeln im laufenden Betrieb ohne zeitliche Verzögerung abgerufen und umgesetzt werden können, steht das Wissen gegenüber, dass die Anzahl der Lastfälle, die zur Ermittlung der Regelbasis herangezogen wurden, immer endlich sein wird und somit vor allem bei komplexen Systemen nicht gewährleistet werden kann, alle möglichen Fälle abzudecken.

Diese Tatsache wird von Befürwortern der modellprädiktiven Steuerung in der Regel als Argument für deren Anwendung angeführt. Diese zeichnen sich darüber hinaus durch hohe Effektivität, Flexibilität bezüglich der denkbaren Zielvorgaben sowie ihrer Gewichtung und allgemeine Übertragbarkeit auf unterschiedlichste Netzstrukturen aus. Sogar während des Betriebes ist die Anpassung an veränderte Gegebenheiten möglich. Damit ist eine systematische Berücksichtigung aller denkbaren Ausfallsituationen und deren Kombinationen realisierbar (Meßmer und Papageorgiou, 2009). Skeptiker halten dagegen, dass die berechneten Steuerungsentscheidungen nicht immer direkt nachvollziehbar sind und dass die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen unzuverlässig werden können, wenn die angesetzten Randbedingungen nicht mehr gelten (z.B. beim Ausfall von Messgeräten).

2.1.3. Steuerungsziele

Das grundsätzliche Ziel eines Abflusssteuerungssystems ist die bestmögliche Ausnutzung des bestehenden Entwässerungssystems, wobei immer die Überflutungs- und Betriebssicherheit gewährleistet werden müssen. Als klassische Betriebsziele nennen Becker und Englmann (1986) neben der überschwemmungsfreien Entwässerung die Reduzierung der Entlastungswassermengen und die Vergleichmäßigung der Kläranlagenzuläufe. Sie stellten aber auch bereits seinerzeit fest, dass die Frage offen bleibt, nach welchem Parameter in Zukunft gesteuert werden soll, da die Steuerung nur nach Durchfluss und Wasserstand in vielen Fällen das eigentliche Problem des Gewässerschutzes nicht löst.

Bei der Festlegung der Steuerungsziele und der damit verbundenen Steuerungsstrategien stellt sich die Frage, welche Kenngrößen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Steuerungssystems herangezogen werden. An diese Vorgabe ist unmittelbar die Komplexität des zu modellierenden Systems gekoppelt. Grundsätzlich können hierbei

abflussbasierte, schmutzfrachtbasierte und immissionsorientierte Steuerungssysteme unterschieden werden (Schütze et al., 2002a).

Die ersten in den USA entwickelten Abflusssteuerungssysteme wurden generell mit dem Vorsatz entwickelt, das Entlastungsvolumen der Mischwasserkanalisationen zu verringern (z.B. Gibbs et al. (1972), Anderson und Callery (1974), Labadie et al. (1974)). Die Verminderung der Entlastungsvolumina ist bis heute das meistverwendete Steuerungsziel. Dies hängt sicher damit zusammen, dass die Anforderungen hinsichtlich der Simulationsmodelle hierfür geringer sind als für die schmutzfracht- oder gewässergütebasierte Steuerungsziele. Erforderlich ist lediglich ein Modell zur Simulation der Abflüsse, wobei es zunächst einmal grundsätzlich egal ist, welche Berechnungsansätze diesem zugrundeliegen.

Ziel der schmutzfrachtbasierten Steuerung ist die Minimierung der aus Kanalnetz und Kläranlage emittierenden Schmutzfrachten, für deren Berechnung ein entsprechendes Simulationsmodell erforderlich ist (siehe Kapitel 2.3.2). Der simulationstechnische Mehraufwand für eine schmutzfrachtbasierte Steuerungen ist gering, in der Praxis sind sie aber selten, da der praktische Aufwand für die Schmutzstoffmessungen deutlich größer ist als für Abflussmessungen und gemeinhin eine Relation zwischen den ausgetragenen Abflüssen und den korrespondierenden Schmutzstofffrachten vorausgesetzt wird. Beispiele für Untersuchungen zu schmutzfrachtbasierten Steuerungen liefern Weinreich et al. (1997) oder Jakobs (1998).

Bei Steuerungssystemen mit dem unmittelbaren Ziel, die Gewässergüte zu verbessern, handelt es sich im Gegensatz zu den beiden anderen Steuerungssystemen um eine Immissionsbetrachtung des Gewässers. Solche Systeme werden daher immissionsorientierte Steuerungen genannt². Im Sinne des Gewässerschutzes ist die immissionsorientierte Steuerung das folgerichtige Verfahren, da Güteparameter direkt evaluiert werden und nicht Ersatzkriterien wie Entlastungsvolumen oder –frachten verwendet werden. Es ist allerdings deutlich aufwändiger als abfluss- oder schmutzfrachtbasierte Steuerungen, da eine integrierte Modellierung des gesamten Entwässerungssystems unter Berücksichtigung der Komponenten Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer erforderlich ist. Die Steuerungsziele orientieren sich in erster Linie an den rechtlichen Randbedingungen, d.h. an den Kenngrößen, die in den entsprechenden Regelwerken als Zielgrößen bei immissionsorientierten Planungen angesetzt werden sollen (weitergehende Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 2.3.3 zur integrierten Modellierung). In der Regel handelt es sich bei den Zielgrößen um Sauerstoff und Ammoniak. Entscheidend für die Steuerung ist, dass diese Parameter mit Simulationsmodellen berechnet werden können und entsprechende Messgeräte für den Einsatz in natürlichen Gewässern zur Verfügung stehen.

² Zur Abgrenzung des Begriffs *immissionsorientierte Steuerung* von dem ebenfalls häufig verwendeten Begriff *integrierte Steuerung* sei auf Kapitel 2.4.1 verwiesen.

2.1.4. Steuerungsstrategien

Die Steuerungsstrategie beschreibt die Vorgehensweise zum Erreichen der formulierten Steuerungsziele. Schilling (1990) definiert die Steuerstrategie als die zeitliche Folge der Sollwerte lokaler Regelkreise oder die Vorschrift zur Festlegung dieser Sollwerte. Mit der Steuerstrategie sollen unter Berücksichtigung momentaner und zukünftiger Abflusszustände die Steuerungseinrichtungen so eingestellt werden, dass die Zielsetzungen nicht nur im Mittel, sondern auch zu jedem Zeitpunkt bestmöglich erreicht werden. In DWA (2005) werden die folgenden Basisstrategien genannt:

- Gleichmäßige Beaufschlagung der Kläranlage anstreben.
- Gleichmäßige Auslastung von Speicherraum anstreben.
- Mischwasserentlastungen erst zulassen, wenn alle Speicherräume gefüllt sind.
- Bei Beckenfüllungen unterschiedliche Verschmutzungsgrade des Abwassers berücksichtigen, um zum Beispiel Speicherkapazitäten für behandlungsbedürftige Abflüsse vorzuhalten.
- Ablagerungen vermeiden.
- Vergleichmäßigung des Zulaufs zur Kläranlage, insbesondere eine Vermeidung der Entleerung von Speicherbecken bei erhöhtem Kläranlagenzulauf, um eine zusätzliche Belastung der Kläranlage zu vermeiden.
- Berücksichtigung des aktuellen Zustandes der Kläranlage, insbesondere bei kritischen Zuständen (zum Beispiel bei erhöhter Schlammspiegelbildung im Nachklärbecken), ggf. Reduktion des Kläranlagenzuflusses.
- Berücksichtigung des aktuellen Zustandes (Hydraulik und Güte) des Gewässers, zum Beispiel dadurch, dass zunächst in weniger sensitive Gewässer entlastet wird.
- Nicht behandlungsbedürftiges Überstandswasser von Regenbecken direkt ins Gewässer einleiten.

Beschreibungen, durch welche mathematischen Ansätze die Strategien letztlich umgesetzt werden, existieren kaum. Eine Ausnahme bilden hierbei Borsanyi et al. (2008), die für zwei Strategien (gleichmäßige Auslastung von Regenüberlaufbecken und Vermeidung von Entlastungen am letzten Becken vor der Kläranlage) die entsprechenden Berechnungsvorschriften präsentieren, die für die regelbasierte Steuerung angesetzt werden.

2.2. Steuerungspotenzial

Das Steuerungspotenzial bezeichnet das Potenzial zur Verbesserung des Systemverhaltens durch Echtzeitsteuerung. Gemessen wird dies durch einen Vergleich mit einem Referenzszenario, in der Regel also dem ungesteuerten System, wobei hierbei gewährleistet werden sollte, dass auch das ungesteuerte System im Sinne des Steuerungsziels optimal eingestellt ist. Grüning (2008) erläutert zum Beispiel diesbezüglich, dass vor der Bewertung der Effizienz einer Abflusssteuerung mit dem Ziel, die Entlastungsvolumina zu minimieren,

generell eine Optimierung der Drosseleinrichtungen durchgeführt werden sollte, da hierdurch bereits Mischwasserentlastungen reduziert werden können.

Entscheidungshilfen zur Abschätzung des Steuerungspotenzials wurden durch DWA (2005) und Schütze et al. (2002b) bzw. Zacharof et al. (2004) erarbeitet. Innerhalb des Planungsprozesses sind diese Entscheidungshilfen in der Vorplanungsphase anzuwenden. Sie dienen dazu, auf Grundlage vorhandener bzw. einfach zu erhebender Informationen eine Abschätzung hinsichtlich der Steuerungswürdigkeit durchzuführen und somit aufwändige und kostenintensive Untersuchungen zu vermeiden. Für die Abschätzung des Steuerungspotenzials nach (DWA, 2005) werden hauptsächlich Kenndaten des urbanen Entwässerungsgebiets und dem dazugehörigen Kanalnetz sowie dessen betrieblichem Verhalten verwendet. Gewässer und Kläranlage haben einen deutlich geringeren Einfluss auf das Ergebnis. Die entwickelte Bewertungstabelle basiert auf der Erfahrung der beteiligten Fachingenieure und unterscheidet sich somit von der Potenzialmatrix, die durch Schütze et al. (2002b) bzw. Zacharof et al. (2004) anhand von Simulationsrechnungen eines hypothetischen Fallbeispiels entwickelt wurde. Ihre Untersuchungen wurden allerdings explizit im Kontext der integrierten Entwässerungsplanung durchgeführt, so dass hier Kennwerte aus den Teilsystemen Kanalnetz, Kläranlage und Fließgewässer gleichermaßen zur Abschätzung des Steuerungspotenzials herangezogen werden.

Aus allen Veröffentlichungen zum Thema Steuerungspotenzial lässt sich ableiten, dass vor allem große und heterogene Entwässerungssysteme mit vielen Mischwasserbehandlungsanlagen und einem hohem Gesamtspeichervolumen in flachen Gebieten ein hohes Steuerungspotenzial besitzen. Jorgensen et al. (1995) führten zum Beispiel Analysen zum Steuerungspotenzial auf der Basis von Simulationsrechnungen fiktiver Entwässerungssysteme durch und stellten fest, dass die Steuerungswürdigkeit mit dem spezifischen Beckenvolumen, der Heterogenität und der Fließzeit im Kanalnetz steigt. Ihrer einfachen Abschätzung zur Folge können in großen Kanalnetzen durch optimale Steuerungsstrategien die Entlastungsvolumen in Mischwassernetzen um etwa 25 % reduziert werden.

Darüber hinaus finden sich vielfach pauschale Aussagen zum Thema Steuerungspotenzial: Grüning (2008) erklärt, dass es in jedem Entwässerungsnetz ungenutzte Reserven und auf jeder Kläranlage betriebsbedingte Schwankungen gibt. Aufbauend auf einer langjährigen Erfahrung auf dem Gebiet der Abflusssteuerung und aus Sicht der Betriebspraxis formuliert Fuchs (2005): „Die Vorteile der Verbundsteuerung kommen dann zum Tragen, wenn

- viele und unabhängig aktivierbare Steuerungseinrichtungen vorhanden sind,
- eine ungleichmäßige Beaufschlagung bzw. Überlastungsverhalten vorhanden ist,
- variable Betriebsbedingungen vorliegen und
- hohe Anforderungen an das Betriebsergebnis gestellt werden.

Hinweise auf das Steuerungspotenzial können bereits vorliegende Kanalnetzberechnungen geben (Kraft, 1996). Demnach ist die Belastungsverteilung im Netz von Bedeutung, d.h. wie häufig Entlastungen oder Überlastungen im Kanalnetz auftreten, obwohl an anderen Stellen noch Behandlungskapazitäten verfügbar sind bzw. ob generell bei Regenereignissen noch verfügbares Stauvolumen vorhanden ist.

Letztlich ermöglichen die (sich aus den genannten Aussagen ableitbaren) Daumenregeln sowie die zur Verfügung stehenden Werkzeuge nur unscharfe Aussagen zur Abschätzung des Steuerungspotenzials. Eine Quantifizierung des Potenzials kann nur an Hand von Simulationsrechnungen erfolgen, wofür aber wiederum die entsprechende Software zur Verfügung stehen muss.

2.3. Prozessmodellierung und Optimierung

Die Modellierung der in Entwässerungssystemen ablaufenden Abfluss- und Stofftransportprozesse ist praktisch für alle Steuerungssysteme obligatorisch. Art und Umfang der Prozessmodellierung, d.h. mit welchen Verfahren der Abfluss und ob zusätzlich der Stofftransport modelliert werden muss, ist abhängig von den Steuerungszielen. Die folgende Zusammenstellung besitzt daher eine Analogie zu den Steuerungszielen, die in Kap. 2.1.3 kategorisiert wurden. Es folgt eine Übersicht der Optimierungsmethoden, die bei modellprädiktiven Steuerungssystemen in jedem Fall erforderlich sind und die bei Offline-Steuerungen ebenfalls zur Verbesserung der Steuerungsregeln eingesetzt werden können (siehe hierzu auch Schütze et al. (2001)).

2.3.1. Abflussmodellierung

Bei der Modellierung von Abflüssen in Kanalnetzen werden zwei Phasen unterschieden: der Niederschlag-Abfluss-Prozess auf der Oberfläche zur Ermittlung der Einleitungswellen in das Kanalnetz und der Abfluss innerhalb des Kanalnetzes. Da bei den Simulationsstudien im Rahmen dieser Arbeit die Niederschlag-Abfluss-Modellierung nicht weitergehend betrachtet wird (siehe Kapitel 4), soll hier auf die Berechnungsansätze zur Modellierung der Abflussbildung, der Abflusskonzentration und der Abflusstransformation auf der Oberfläche nicht weiter eingegangen werden. Für detaillierte Informationen zu den Berechnungsansätzen sei auf Dyck und Peschke (1995), Ostrowski (2009) oder Maniak (2010) verwiesen.

Die Berechnung der Abflüsse im Kanalnetz umfasst die Kanäle und die Sonderbauwerke, d.h. Regenüberlaufbecken, Regenüberläufe, Pumpwerke usw. mit den dazugehörigen hydraulischen Elementen wie Wehre, Drosselorgane und Schieber. Für eine detaillierte Abflussberechnung im Kanal werden hydrodynamische Modelle verwendet, bei denen der Abfluss auf Basis der St.-Venant-Gleichungen berechnet wird. Diese beschreiben den instationären, ungleichmäßigen Abflussvorgang mit Hilfe der Bewegungsgleichung

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + I_R - I_S = 0 \quad \text{Gl. 2.1}$$

und der Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{Gl. 2.2}$$

mit:

g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
v	Mittlere Geschwindigkeit in Fließrichtung	[m/s]
t	Zeitkoordinate	[s]
x	Wegkoordinate in Fließrichtung	[m]
y	Füllhöhe im Profil bzw. Wassertiefe (normal zur Sohle)	[m]
I_R	Reibungsgefälle	[-]
I_S	Sohlgefälle	[-]
Q	Durchfluss	[m ³ /s]
A	Fließquerschnitt normal zur Sohle	[m ²]

Aus mathematischer Sicht handelt es sich um ein System hyperbolischer Gleichungen, für das keine analytische Lösung existiert. Die Lösung erfolgt daher mit Hilfe numerischer Verfahren nach örtlicher und zeitlicher Diskretisierung. Die bekanntesten numerischen Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen sind die Methoden der Charakteristiken, der Finiten-Differenzen (FD), der Finiten-Volumen (FV) und der Finiten-Elemente (FE). Für Kanalnetzberechnungen sind entweder Finite-Differenzen-Verfahren oder Finite-Volumen-Verfahren geeignet. Die hydrodynamischen Verfahren liefern örtliche und zeitliche Informationen des Abflusses und des Wasserstandes. Bei der Modellierung wird das Entwässerungssystem in der Regel schacht- und haltungsgenau abgebildet. Die numerischen Berechnungsverfahren sind daten- und zeitintensiv und führen unter bestimmten Voraussetzungen zu stabilen numerischen Ergebnissen.

Der Rechenaufwand wird geringer, wenn einzelne Terme der Bewegungsgleichung (Gl. 2.1) vernachlässigt werden. Die Vernachlässigung der ersten beiden Terme zur Beschreibung der lokalen und konvektiven Beschleunigung führt zur Diffusionswelle:

$$\frac{\partial y}{\partial x} + I_R - I_S = 0 \quad \text{Gl. 2.3}$$

Wird zusätzlich der Term für die Druckdifferenz gestrichen, folgt aus Gl. 2.1 die kinematische Wellenapproximation:

$$I_R - I_S = 0 \quad \text{Gl. 2.4}$$

Durch die Annahme, dass das Reibungsgefälle gleich dem Sohlgefälle ist, wird der Abfluss zu einer eindeutigen Funktion der Wasserspiegelhöhe. Rückstau- und Dämpfungseffekte werden dann nicht mehr abgebildet. Untersuchungen von Verworn (1980) und Schmitt (1985) haben gezeigt, dass die Vereinfachung der vollständigen Bewegungsgleichung vor allem bei steilen Abflusswellen und bei geringem Sohlgefälle deutliche Auswirkungen auf die resultierenden Abflussganglinien hat.

Im Vergleich zu den hydrodynamischen Modellen wird bei den hydrologischen bzw. konzeptionellen Verfahren die instationäre Bewegungsgleichung durch eine meist lineare Volumen-Abfluss-Beziehung ersetzt:

$$Q_{ab}(t) = f(V) \quad \text{Gl. 2.5}$$

Für die Massenerhaltung wird die über den Weg integrierte Kontinuitätsgleichung verwendet:

$$Q_{zu}(t) - Q_{ab}(t) = \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{Gl. 2.6}$$

mit:

Q_{ab}	Abfluss aus Speicherelement	[m ³ /s]
Q_{zu}	Zufluss zum Speicherelement	[m ³ /s]
V	Volumen des Speicherelements	[m ³]
t	Zeitkoordinate	[s]

Durch diese Vereinfachungen geht die Information über die zeitliche Veränderung der Wasserstand-Abflussbeziehung (instationäre Abflussschleife) verloren, stattdessen wird eine stationäre Abflusskurve verwendet. Damit wird die Berücksichtigung rückwärtiger Einflüsse auf den jeweiligen örtlichen Abfluss ausgeschlossen. Der Vorteil der hydrologischen Verfahren besteht darin, dass die Gleichungen analytisch gelöst werden können und somit schnelle und stabile Ergebnisse liefern. Bei der Berechnung werden lediglich Massenbilanzen berechnet, Wasserstände werden nur aus der stationären Abflusskurve ermittelt. Das Kanalnetz wird gegenüber den hydrodynamischen Verfahren weniger detailliert abgebildet. Zumeist wird ein Grobnetz betrachtet, bei dem mehrere Schächte und Haltungen mit gleichen oder ähnlichen Übertragungseigenschaften zu einzelnen Elementen zusammengefasst werden. Vor- und Nachteile der beiden Ansätze sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Hydrodynamische Verfahren (numerische Lösung)	Hydrologische Verfahren (analytische Lösung)
+ Berücksichtigung von Rückstau	+ kurze Rechenzeiten
+ örtliche und zeitliche Abflussberechnung	+ geringerer Datenaufwand
+ detaillierte Abbildung des realen Systems	- keine Berücksichtigung von Rückstau
- lange Rechenzeiten	- vereinfachte Wasserstandberechnung
- großer Datenaufwand	- ungenauere Abbildung des realen Systems

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile von hydrodynamischen und hydrologischen Berechnungsverfahren

Noch einfachere Abflussberechnungsansätze sind möglich, z.B. eine einfache Fließzeitverschiebung, bei der keine Wellendeformation berücksichtigt wird. Diese Ansätze erfordern praktisch keinen Rechenaufwand, eine realistische Abflussmodellierung kann damit aber nicht gewährleistet werden.

Die Modellierung der Sonderbauwerke erfolgt bei den hydrodynamischen Modellen durch eine möglichst detaillierte Erfassung der Bauwerksgeometrie. Ihre Berechnung basiert in der Regel auf der eindimensionalen Hydraulik. Bei den hydrologischen Modellen werden die Sonderbauwerke meist durch Kennlinien beschrieben.

In der wasserwirtschaftlichen Planung bestimmt die jeweilige Aufgabenstellung den erforderlichen Modellansatz. Bei Kanalnetzberechnungen werden üblicherweise

hydrodynamische Modelle für Überstau- bzw. Überflutungsnachweise verwendet. Hydrologische Modelle werden meist bei Schmutzfrachtberechnungen für die Bemessung und Nachweisführung von Mischwasserentlastungsanlagen eingesetzt.

2.3.2. Schmutzfrachtmodellierung

Ziel der Schmutzfrachtberechnung ist die Ermittlung der aus dem Kanalnetz ausgetragenen Schmutzfrachten. Leitparameter für die Charakterisierung der Schmutzfracht sind Summenparameter zur Quantifizierung der organischen Verschmutzung wie der biochemische oder der chemische Sauerstoffbedarf (BSB oder CSB). Die Schmutzfrachtberechnung ist komplexer als die Kanalnetzberechnung, da zusätzlich zum Abfluss noch die Schmutzstoffe modelliert werden müssen. Analog zur Abflussberechnung werden die Prozesse auf der Oberfläche und im Kanal getrennt modelliert. Da bei den Simulationsstudien in dieser Arbeit die Prozesse auf der Oberfläche nicht im Detail berücksichtigt werden, werden die Berechnungsgrundlagen zur Schmutzakkumulation und -abtrag hier nicht ausgeführt. Ausführliche Informationen hierzu finden sich bei Verworn (1999).

Auch bei der Schmutzfrachtmodellierung kann die Abflussberechnung sowohl mit hydrologischen als auch mit hydrodynamischen Ansätzen erfolgen. Für die Berechnung der Schmutzstoffe werden in der Regel ausschließlich Transport- und Mischungsprozesse im Kanal sowie Absetzprozesse in den Speicherbauwerken berücksichtigt. Stoffumwandlungen werden in den herkömmlichen Simulationsmodellen meist vernachlässigt. Weitergehende Informationen zu Umwandlungsprozessen in Kanalnetzen sind z.B. in Ashley et al. (1999) und Ashley et al. (2005) zu finden.

Der Einsatz von Schmutzfrachtmodellen ist in einigen Bundesländern obligatorisch, um nachzuweisen, dass das Kanalnetz nach dem aktuellen Stand der Technik betrieben wird. Hierfür werden hydrologische Modelle eingesetzt. Wie von Schmitt (1985) nachgewiesen, haben hydrodynamischen Effekte bei der Schmutzfrachtberechnung allerdings einen wesentlichen Einfluss auf die Schmutzfrachtbilanz. Er stellte fest, dass

- Vereinfachungen bei der Kanalnetzberechnung nicht nur bei wenigen Extremereignissen größere Ungenauigkeiten bewirken und
- die Aktivierung von Netzvolumen für das Abfluss- und Entlastungsverhalten eine maßgebliche Bedeutung besitzt.

Ähnliche Ergebnisse veröffentlichten Krebs et al. (1999). Sie stellen fest, dass Spülstoßeffekte zur Abschätzung der Spitzenfrachten von gelösten Schmutzstoffen (wie z.B. Ammonium) nur mit hydrodynamischen Modellen erfasst werden können.

2.3.3. Integrierte Modellierung

Der Begriff „integrierte Modellierung“ wird in der urbanen Entwässerungsplanung verwendet, sobald mindestens zwei der drei Teilprozesse des Entwässerungssystems (Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer) berücksichtigt werden (HSGSim, 2008). Urbane

Entwässerungssysteme sind integriert zu bewirtschaften, weil die Betrachtung der einzelnen Komponenten nicht zwingend die beste Lösung für das gesamte System liefert (z.B. Ostrowski et al. (1989), Lijklema et al. (1993)). Simulationsstudien mit integrierten Modellen sind allerdings erst in jüngerer Zeit aufgrund der steigenden Rechenkapazitäten möglich, wobei auch diesbezüglich immer noch Einschränkungen bestehen. Nicht zuletzt auf Grund gesetzlicher Vorgaben wird die Anwendung integrierter Modelle in Zukunft mit Sicherheit den Stand der Technik definieren.

Neben der Gewährleistung der Siedlungshygiene und des Überflutungsschutzes ist es eine wesentliche Aufgabe der Entwässerungsplanung, die Veränderungen des natürlichen Wasserhaushaltes in mengenmäßiger und stofflicher Hinsicht so gering wie möglich zu halten (DWA, 2006). Ziel der integrierten Modellierung ist die Quantifizierung der Veränderungen der natürlichen Wasserkörper.

Gemäß den Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU, 2000) sollen alle Wasserkörper einen guten ökologischen und chemischen Zustand erreichen. Der gute ökologische Zustand definiert sich neben chemischen über biologische und hydromorphologische Merkmale, die mit Hilfe von deterministischen Simulationsmodellen kaum zu erfassen sind. Zielgrößen zur Abschätzung der Gewässergüte bei der integrierten Modellierung sind daher in der Regel chemische und physikalische Parameter: Konzentrationen für Sauerstoff, organische Schmutzstoffe sowie Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor, außerdem Abflusswerte zur Quantifizierung von hydraulischem Stress. Im Gegensatz zu den emissionsorientierten Kanalnetz- und Schmutzfrachtberechnungen, bei denen indirekte Größen wie Entlastungsvolumen und -frachten ermittelt werden, handelt es sich somit um eine immissionsorientierte Modellierung. Die mit Hilfe dieser Parameter beschriebenen Gefährdungen der Wasserkörper können allerdings unterschiedliche Wirkungen haben. Differenzieren lassen sich diese über die Wirkungsdauer (HSGSim, 2008):

- Akute Gefährdungen entstehen über kurze Zeiträume (bis zu wenigen Stunden) und können aus hydraulischen und / oder chemischen Belastungen resultieren.
- Verzögerte Wirkungen im Bereich von mehreren Stunden bis Tagen können sich ebenfalls aus chemischen Belastungen ergeben, wobei hier insbesondere Sauerstoffdefizite aufgrund sauerstoffzehrender Inhaltsstoffe zu nennen sind.
- Langzeitwirkungen über Wochen, Monate oder Jahre können aus einer Eutrophierung des Gewässers sowie aus der Anreicherung von Schadstoffen (z.B. Schwermetallen) resultieren.

Von der DWA existiert mit dem Merkblatt *DWA-M 153: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser* (DWA, 2007) lediglich ein Regelwerk zum Thema immissionsorientierte Bewirtschaftung, das allerdings keine konkreten Nachweisgrößen für die immissionsorientierte Bewertung vorgibt. In Hessen wurde der *Leitfaden für das Erkennen ökologisch kritischer Belastungen durch Abwassereinleitungen* (Borchardt und Günther, 2004) eingeführt, dessen Vorgaben durch Kanalnetzbetreiber verpflichtend für die Erlangung von Einleitungsgenehmigungen anzuwenden ist. Andere Bundesländer orientieren sich an den Merkblättern des BWK (*BWK-M3: Ableitung von immissionsorien-*

tierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse (BWK, 2007) und *BWK-M7: Detaillierte Nachweisführung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gemäß BWK-Merkblatt 3* (BWK, 2008)). Der hessische Leitfaden und die BWK-Merkblätter geben als hydraulische Zielgrößen maximale Einleitungsabflüsse und als stoffbezogene Kenngrößen Grenzwerte für Sauerstoff- und Ammoniakkonzentrationen im Gewässer vor ($O_2 > 5 \text{ mg/l}$ und $NH_3-N < 0,1 \text{ mg/l}$), d.h. es werden primär Stoffeinträge betrachtet, die zu akuten und / oder verzögerten Gefährdungen führen.

Simulationssoftware für die integrierte Modellierung des gesamten Entwässerungssystems, d.h. bei denen alle drei Komponenten Kanalisation, Kläranlage und Gewässer berücksichtigt werden, wurde bislang vor allem im Rahmen wissenschaftlicher Projekte entwickelt. Aufgrund fehlender Dokumentationen sind diese Modelle in der Regel für die praktische Anwendung durch Außenstehende aber nicht geeignet sind. In der wasserwirtschaftlichen Praxis haben sich integrierte Simulationsmodelle noch nicht etabliert. Die Gründe und damit die wesentliche Probleme bei der integrierten Modellierung sind im Folgenden zusammengestellt:

- Simultane Simulationen des gesamten Entwässerungssystems sind nicht ohne weiteres durchführbar, da die bestehenden Modelle der einzelnen Teilprozesse unterschiedliche Prozessvariablen zur Beschreibung der Gewässerinhaltsstoffe verwenden. Für eine integrierte Modellierung müssen entweder einheitliche Prozessvariablen verwendet werden oder Schnittstellen geschaffen werden, die eine Umwandlung der Prozessvariablen ermöglichen.
- Die Anwendung integrierter Simulationsmodelle wird oft durch den Mangel an Daten erschwert. Dies betrifft sowohl die Eingabedaten für die Modellerstellung als auch die fehlende Daten zur Modellkalibrierung bzw. zur Parameteranpassung.
- Algorithmen zur Beschreibung der physikalischen Prozesse sind noch unbekannt bzw. mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies betrifft vor allem Stoffumwandlungsprozesse im Kanalnetz sowie die Modellierung der Prozesse, die den biologischen Gewässerzustand im Gewässer definieren.
- Es fehlt die Akzeptanz bei Betreibern. In Verwaltung und Management existiert immer noch eine Trennung der Bereiche Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer, so dass die Umsetzung von integrierten Ansätzen bereits durch verwaltungstechnische Abläufe erschwert wird.

Zur Demonstration der Komplexität sind in Abbildung 2.5 die Teilsysteme eines integrierten Entwässerungssystems sowie die dazugehörigen Stoffparameter dargestellt, die bei der Gütemodellierung abgebildet werden müssen. Bei den genannten Kenngrößen handelt es sich um die wesentlichen Parameter, die sich bei der Verwendung von klassischen Modellierungsansätzen ergeben (d.h. Modellierung der Kläranlage mit ASM1 (Henze et al., 2000) und des Gewässers mit RWQM1 (Reichert et al., 2001)). Die Abbildung verdeutlicht die Schwierigkeiten, die sich durch die unterschiedliche Modellierung der verschiedenen Stofffraktionen in den jeweiligen Teilsystemen ergibt. Die

sich hieraus ergebende Aufgabe zur Erstellung von Schnittstellen zwischen den Teilsystemen ist somit eine wesentliche Aufgabe bei der Erstellung eines integrierten Modells.

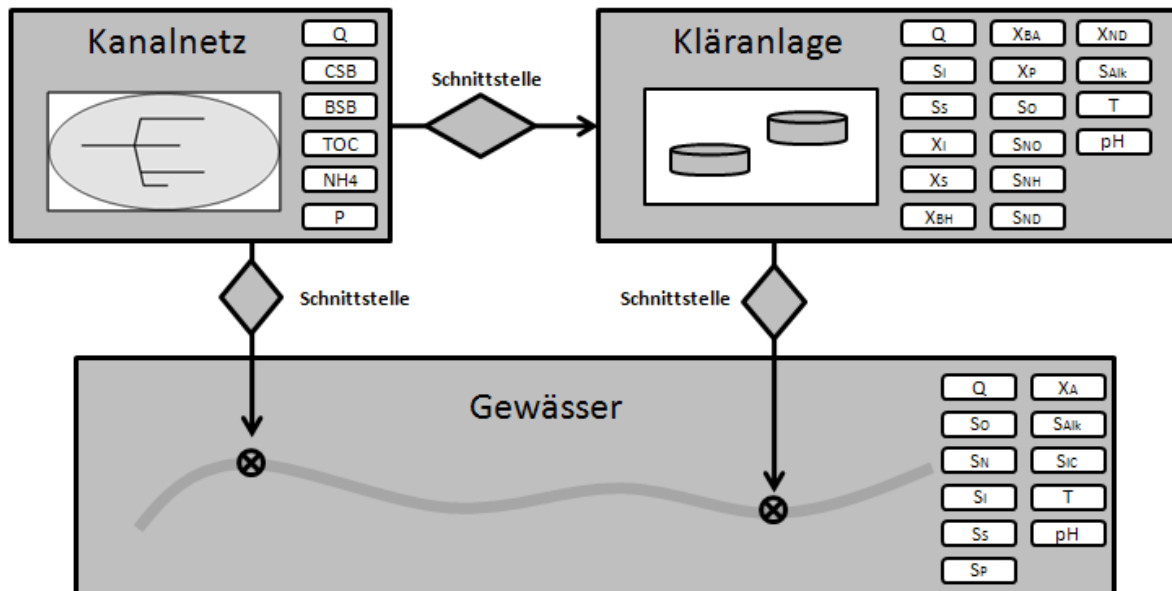


Abbildung 2.5: Teilsysteme bei der integrierten Modellierung einschließlich Stoffparameter

Aktuell gibt es mit SIMBA und WEST zwei kommerzielle Simulationssysteme, die als integrierte Simulationswerkzeuge im engeren Sinne betrachtet werden können (HSGSim, 2008). SIMBA wird entwickelt und vertrieben durch das Institut für Automation und Kommunikation (ifak) in Magdeburg. Es ist eine Simulationssoftware, die in der Entwicklungsumgebung MATLAB / Simulink umgesetzt ist. Die Software ist dadurch flexibel, dass verschiedene Komponenten bzw. Berechnungsansätze eingebunden werden können, wodurch es möglich ist, den Detaillierungsgrad der Simulationen anzupassen. WEST wird entwickelt und vertrieben von der Firma HEMMIS (Kortrijk, Belgien). Die Software wurde auf der Grundlage eines bestehenden Kläranlagenmodells erstellt, so dass sie entsprechend auf diesem Gebiet ihre Stärken hat. Zusammenstellungen von alternativen Simulationsmodellen, die vor allem im Rahmen von wissenschaftlichen Forschungsprojekten entwickelt wurden, finden sich in z.B. in Schütze et al. (2002a), Erbe et al. (2002) und Muschalla (2006).

Als Berechnungsansätze sind in allen Teilsystemen grundsätzlich unterschiedliche Detaillierungsgrade bei der Modellierung möglich. Für die Berechnung der Abflüsse und des Stofftransports im Kanalnetz können theoretisch alle in Kapitel 2.3.1 und 2.3.2 genannten Ansätze zum Einsatz kommen. Die hydraulische Modellierung der Kläranlage ist wegen der geringen Prozessdynamik unkompliziert. Deutlich komplexer ist in Kläranlagen die Berechnung der Stoffumsätze, wobei sich auch hier Unterschiede für verschiedene Kläranlagentypen ergeben. Für das am häufigsten anzutreffende Belebtschlammverfahren ist eine detaillierte Modellierung der biologischen Umsetzungsprozesse erforderlich (Henze et al., 2000). Hierbei werden reaktionskinetische Prozesse berechnet, die eine Anwendung von numerischen Verfahren erfordern. Einfachere Modellierungsansätze existieren praktisch nicht (Heusch et al., 2010). Für Fließgewässer gelten ähnlich Voraussetzungen:

Die Gütemodellierung basiert ebenfalls auf den reaktionskinetischen Prozessen (Reichert et al., 2001). Die hydraulische Berechnung kann analog zur Kanalnetzberechnung mit verschiedenen komplexen Ansätzen erfolgen. Für weitergehende Informationen zu den Berechnungsansätzen für Stofftransport und -umwandlungen in Kläranlage und Gewässer sei auf Erbe (2004), Rauch et al. (2005) oder HSGSim (2008) verwiesen.

Grundsätzlich gilt für alle Simulationsstudien der Leitsatz „so detailliert wie nötig, so einfach wie möglich“. Der Detaillierungsgrad der Berechnungsansätze sollte sich immer an den zu beantwortenden Fragestellungen orientieren. Dies gilt auch für immissionsorientierte Abflusssteuerungen, bei denen die Modellierung die für die Steuerung relevanten Mess- und Steuergrößen abbilden können muss. Die Tatsache, dass sich die integrierte Modellierung noch nicht endgültig in der wasserwirtschaftlichen Planung durchgesetzt hat, erklärt entsprechend auch, dass immissionsbasierte Steuerungen ebenfalls derzeit noch ausschließlich theoretischer Natur sind.

2.3.4. Optimierung

Mathematische Optimierungsverfahren können eingesetzt werden, sobald zwischen einem Bewertungskriterium und den Zustandsvariablen ein funktioneller Zusammenhang formuliert werden kann, d.h. der Prozess oder das System mit Hilfe eines mathematischen Modells abgebildet werden kann. Die Komplexität der Modellierung spielt hierbei zunächst keine Rolle, d.h. die im betrachteten System ablaufenden Prozesse können über eine einfache lineare Gleichung oder durch ein hochgradig nicht-lineares Simulationsmodell abgebildet werden. Im Rahmen der Abflusssteuerung werden Optimierungsverfahren bei modellprädiktiven Steuerungssystemen immer eingesetzt. Für Offline-Steuerungen sind Optimierungsverfahren nicht obligatorisch, können aber ohne weiteres z.B. für die Erstellung von Regelsätzen eingesetzt werden.

Optimierungsprobleme werden in der Regel als Minimierungsaufgabe formuliert, bei der ein funktionaler Zusammenhang zwischen den n unabhängigen Zustandsvariablen x und der von diesen Variablen abhängigen Zielfunktion F besteht:

$$\min F(x) = \min F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{Gl. 2.7}$$

mit:

$F(x)$	Zielfunktion
x_i	Unabhängige Zustandsvariablen

Da die Zustandsvariablen in den meisten praktischen Problemstellungen nicht willkürlich gewählt werden können, treten Nebenbedingungen G_j auf. Diese werden entweder als Gleichheits- oder als Ungleichheitsbedingungen formuliert:

$$G_j(x) = G_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} 0 \quad \text{Gl. 2.8}$$

mit:

$G_j(x)$ Nebenbedingungen
 x_i Unabhängige Zustandsvariablen

Handelt es sich sowohl bei der Zielfunktion als auch bei den unabhängigen Zustandsvariablen um skalare Größen, dann spricht man von einer Parameteroptimierung, d.h. es werden die numerischen Werte x_i^* gesucht, für welche die Zielfunktion einen optimalen Wert annimmt. Sind sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen beliebige (nicht-lineare) Funktionen, dann handelt es sich darüber hinaus um eine nicht-lineare Optimierung.

In der urbanen Entwässerungsplanung werden Abfluss und Stofftransport mit Hilfe von Simulationsmodellen berechnet, die bei Optimierungsaufgaben für die Evaluierung der Zielfunktion eingesetzt werden können. In diesem Fall spricht man von einer Parameteroptimierung mit Simulationsmodellen. Da das Abflussgeschehen einen nicht-linearen Charakter besitzt und auch die Zielfunktion nicht-lineare Beziehungen aufweisen kann, ist das Problem darüber hinaus aus mathematischer Sicht als nicht-lineare Optimierung einzustufen.

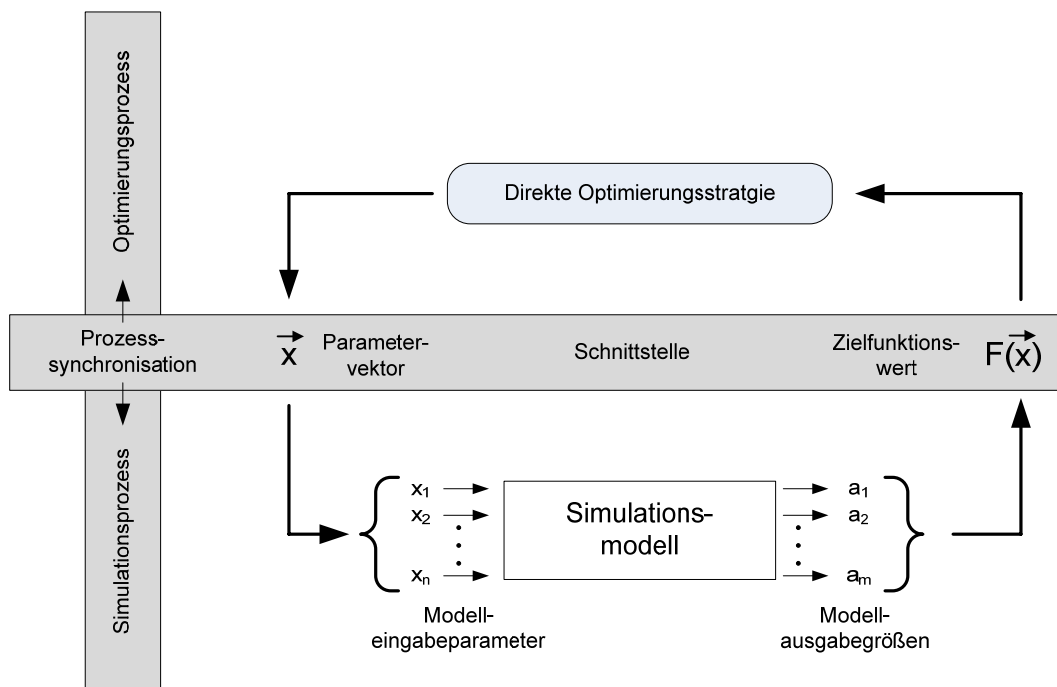


Abbildung 2.6: Direkte Parameteroptimierung mit Simulationsmodellen (Syrjakow, 2005)

Werden bei der Berechnung keine weiteren analytischen Informationen, d.h. ausschließlich die Berechnungsergebnisse des Simulationsmodells, zur Lösung des Optimierungsproblems verwendet, spricht man von einer direkten oder auch „Black-Box“-Optimierung (Abbildung 2.6). Sämtliche Nebenbedingungen des Optimierungsproblems werden dann ebenfalls durch das Prozessmodell definiert. Bei den hier betrachteten Berechnungen von Entwässerungssystemen handelt es sich bei den Nebenbedingungen u.a. um

- den Vektor der Anfangsbedingungen $\underline{x}(0)$,
- die physikalischen Grenzen des Entwässerungssystems (maximale Abflüsse, Speichervolumen),
- die Grenzen der Kontrollvariablen und
- die Systemdynamik, also die Rechenvorschriften zur Berechnung des Abflusses und des Stofftransports.

Der Ablauf bei der direkten Parameteroptimierung mit Simulationsmodellen ist immer iterativ. In jedem Iterationsschritt wird die Zielfunktion durch das Prozessmodell ausgewertet. Ein Ablaufdiagramm ist in Abbildung 2.7 gegeben.

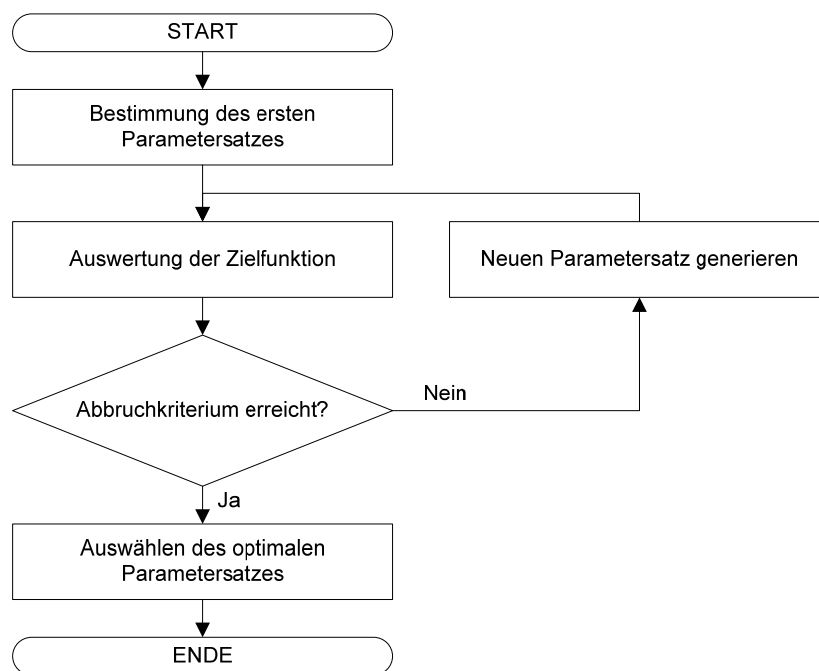


Abbildung 2.7: Ablaufschema bei der direkten Parameteroptimierung

Der direkten Optimierung steht die indirekte Optimierung gegenüber. Bei den Verfahren der indirekten Optimierung wird anstatt des Simulationsmodells ein analytisches Modell verwendet. Das Optimum wird in wenigen Rechenschritten ermittelt, entweder durch Bildung von Differentialquotienten (bei ableitungsbasierten Verfahren) oder durch direkte

analytische Lösung (bei der linearen Programmierung³). Syrjakow (2005) bezeichnet die indirekten Verfahren daher auch als analytische Verfahren, während er die direkten Methoden als „iterative Verfahren ohne zusätzliche analytische Informationen“ bezeichnet (siehe Abbildung 2.8).

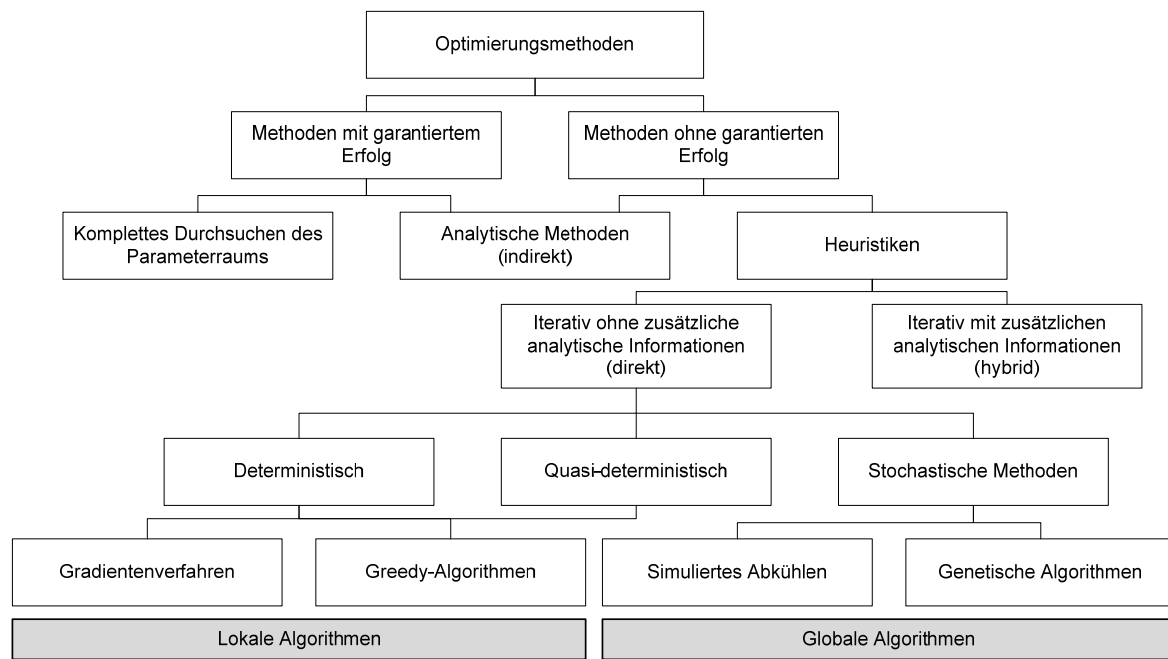


Abbildung 2.8: Klassifizierung von Optimierungsmethoden nach Syrjakow (2005, verändert)

Eine weitere Klassifizierung von Optimierungsverfahren basiert auf der Unterscheidung zwischen lokalen und globalen Methoden. Schütze et al. (2002a) unterteilen Optimierungsmethoden dementsprechend (Abbildung 2.9), wobei sie allerdings bemerken, dass eine strenge Unterscheidung eigentlich nicht möglich ist, da es wechselseitige Beziehungen zwischen einzelnen Algorithmen gibt. So verwenden einige von ihm als globale Algorithmen deklarierte Verfahren lokale Prozeduren, um die Zielfunktion zu korrigieren, die durch den globalen Ansatz gefunden wurde. Der Unterschied zwischen lokalen und globalen Suchalgorithmen lässt sich am einfachsten an Hand einer Landschaft mit mehreren Hügeln erläutern, d.h. einem multimodalen Zielfunktionsraum. Lokale Algorithmen suchen in dieser Landschaft immer das nächste Tal, globale Optimierungsalgorithmen das tiefste Tal in der gesamten Landschaft. Dieses Beispiel verdeutlicht auch, wie wichtig die Anfangsbedingungen bei den lokalen Verfahren sind, da unterschiedliche Startpunkte und Suchrichtungen leicht zu einer anderen Lösung führen. Syrjakow (2005) unterscheidet ebenfalls zwischen lokalen und globalen Optimierungsalgorithmen und ordnet diese innerhalb der Gruppe der direkten Methoden ein. Hieraus wird deutlich, dass

³ Die Verfahren der linearen Programmierung werden ebenso wie die quadratische und nicht-lineare Programmierung auch als lineare, quadratische und nicht-lineare Optimierung bezeichnet.

- mit Ausnahme der linearen und der quadratischen Programmierung, bei denen das Optimum immer global ist – indirekte Verfahren automatisch auch lokale Methoden sind.

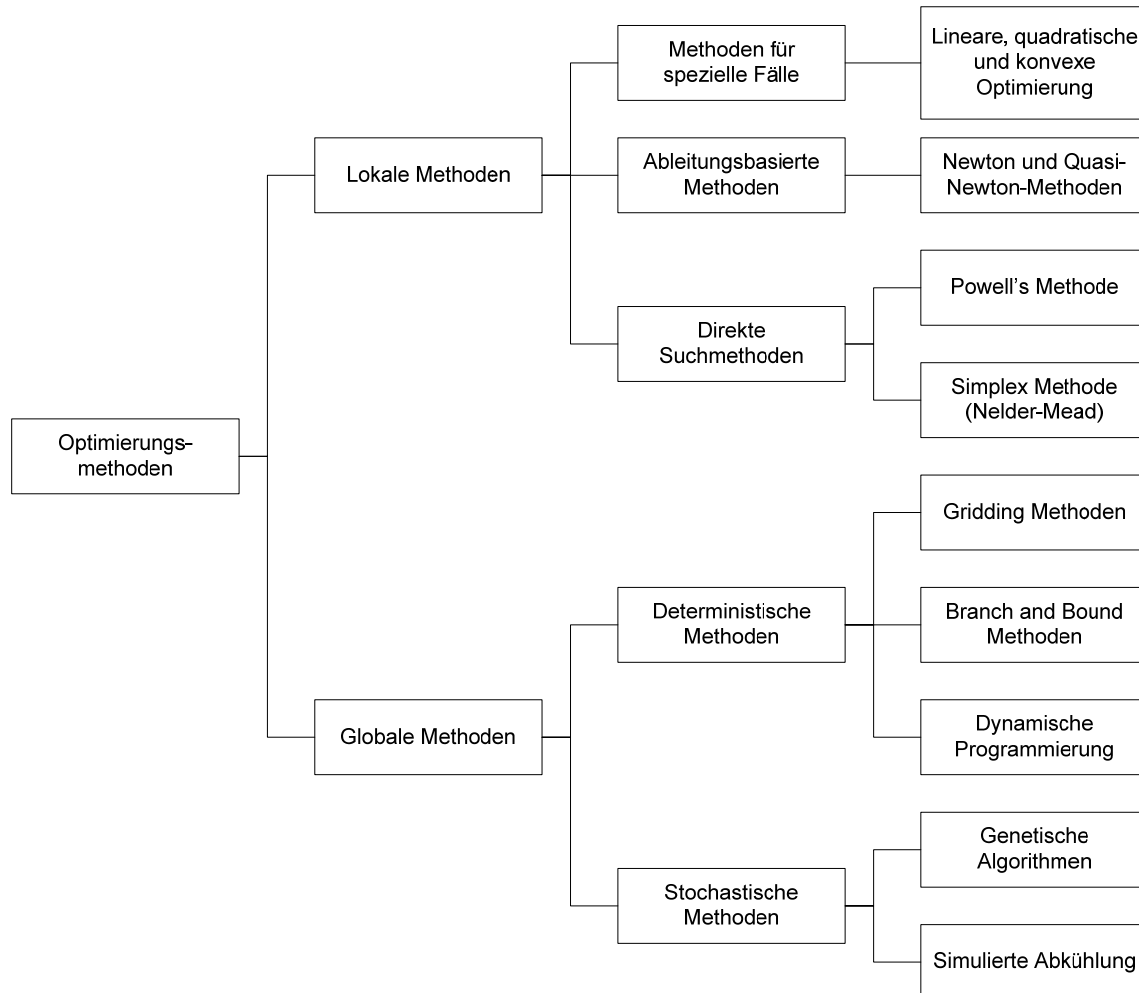


Abbildung 2.9: Klassifizierung von Optimierungsalgorithmen nach Schütze et al. (2002a)

Dochain und Vanrolleghem (2001) unterscheiden in ihrer Klassifizierung zunächst zwischen linearen und nicht-linearen Verfahren und gruppieren dann die nicht-linearen Verfahren ebenfalls in lokale und globale Verfahren. Die lokalen Algorithmen werden darüber hinaus dadurch unterteilt, ob für die Berechnung Informationen über die Gradienten der Zielfunktion hinsichtlich ihrer zu optimierenden Eingabeparameter verwendet werden, d.h. ob es sich um ableitungsbasierte oder ableitungsfreie Verfahren handelt. Die Ableitungsinformationen können dabei entweder analytisch oder durch numerische Approximation ermittelt werden. Die globalen Methoden unterteilen sie in zwei Gruppen: Die erste Gruppe beinhaltet ausschließlich deterministische Verfahren und die zweite Gruppe beinhaltet die stochastischen Verfahren. Die Klassifizierung deckt sich somit im Wesentlichen mit der von Schütze et al. (2002a).

Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit, Optimierungsverfahren miteinander zu koppeln. Diese sogenannten hybriden Methoden fanden für den Einsatz in der Abflusssteuerung bislang keine Beachtung. Der Einsatzmöglichkeiten von hybriden Methoden für die multikriterielle Optimierung wurde zum Beispiel von Deb und Goel (2001) an Hand von klassischen Ingenieuraufgaben der Werkstoffmechanik nachgewiesen. Kerber (2009) entwickelte ebenfalls einen hybriden Algorithmus für multikriterielle Fragestellungen, bei dem Evolutionsstrategien mit einem lokalen Suchverfahren (Methode von Hooke & Jeeves) gekoppelt wurden. Der Algorithmus wurde für die Optimierung von Drosselabgaben eines urbanen Entwässerungssystems eingesetzt. Ziel war es, einen schnelleren Algorithmus zu entwickeln, der mit weniger Zielfunktionsauswertungen gegenüber den klassischen Evolutionsstrategien gleichwertige Ergebnisse liefert. Es zeigte sich allerdings, dass praktisch keine Rechenzeiteinsparungen erzielt werden konnten, da das lokale Suchverfahren für die Minimierung der Zielfunktion bei der gewählten Problematik praktisch ebenso viele Zielfunktionsauswertungen erforderte wie das globale Verfahren.

Die Gliederung von Schütze et al. (2002a) in Abbildung 2.9 verdeutlicht die große Vielfalt an Methoden, die generell für die Lösung von Optimierungsproblemen zur Verfügung stehen. Mit Ausnahme der linearen Optimierung sind alle Algorithmen auch für den Einsatz in der nicht-linearen Parameteroptimierung geeignet. Generell gilt für die Optimierung, dass es keinen einzelnen Algorithmus gibt, der für alle verschiedenen Probleme optimale Ergebnisse liefert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich monokriterielle Optimierungsprobleme betrachtet werden. Multikriterielle Optimierungsverfahren können im Rahmen der Abflusssteuerung nur für offline-Systeme eingesetzt werden, da bei modellprädiktiven Steuerungen zu jedem Steuerungszeitschritt eine Steuerentscheidung gefällt werden muss. Mehrere Zielgrößen können zwar durch eine a-priori-Wichtung der einzelnen Zielfunktionen zu einer Steuerungsentscheidung zusammengeführt werden, woraus letztlich doch wieder eine monokriterielle Methode wird. Anwendungen von multikriteriellen Verfahren für die Ermittlung von Steuerungsregeln wurden von Schütze und To (2002) untersucht.

Die Unterteilung in lokale und globale Algorithmen findet sich auch in der Diskussion über geeignete Optimierungsverfahren für die Abflusssteuerung wieder. Eine Reihe von Autoren erklären, dass für den Einsatz in der Abflusssteuerung globale Methoden eingesetzt werden sollten, da die lokalen Methoden wegen der Komplexität der multimodalen Zielfunktion nicht gewährleisten können, dass das gefundene Optimum ein globales Optimum darstellt (Rauch und Harremoes (1999), Schütze et al. (2002a)). Schütze et al. (2002a) führen hierzu aus, dass für die Echtzeitsteuerung ein effizientes globales Optimierungsverfahren benötigt wird, welches für komplexe Zielfunktionen geeignet ist, die nicht durch klassische ableitungsbasierte Verfahren berechnet werden können. Butler und Schütze (2005) erläutern, dass die Zielfunktionen bei diesen Optimierungsproblemen komplex sind und nur durch ein Simulationsmodell beschrieben werden können. Analytische Definitionen der Zielfunktion und ihre Ableitungen sind daher nicht vorhanden und es ist auch vorab nicht bekannt, ob ein lokales Minimum auch gleichzeitig ein globales Minimum darstellt. Um ein solches Problem zu lösen, sind globale Optimierungsmethoden am besten geeignet. Als weiterer Vorteil wird geltend gemacht, dass die globalen Methoden nur geringe Anforderungen an die Anfangsbedingungen stellen (Schütze et al., 1999). Eine Zusammen-

stellung von Vor- und Nachteilen lokaler und globaler Methoden für die direkte Parameteroptimierung liefert Syrjakow (2005):

	<i>Lokale Methoden</i>	<i>Globale Methoden</i>
<i>Vorteile</i>	Exaktes Finden der optimalen Lösung Hohe Konvergenzgeschwindigkeit Hohe Effizienz	Möglichkeiten zum Ausstieg aus dem sub-optimalen (lokalen) Suchraum
<i>Nachteile</i>	kein Ausstieg aus dem sub-optimalen (lokalen) Suchraum Optimierungsergebnis wird durch die Anfangsbedingungen bestimmt	Langsame Konvergenzgeschwindigkeit in der Umgebung des Optimums Großer Optimierungsaufwand Unsichere Qualität des Optimierungsergebnisses

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteil von lokalen und globalen Optimierungsalgorithmen bei der direkten Parameteroptimierung (Syrjakow, 2005)

2.4. Stand der Technik

Erste Ansätze zur Abflusssteuerung in Kanalnetzen wurden in den USA in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts verfolgt. Ausgelöst wurde dies durch die Einführung des sogenannten ‚Clean-Water-Act‘, der erhöhte Anforderungen an Misch- und Regenwasser-einleitungen stellte und in dessen Zuge eine beträchtliche Anzahl von Forschungsprojekten durch die Environmental Protection Agency (US EPA) gefördert wurden (Schilling, 1986a). Nach IAWPRC (1989) gilt als erstes Steuerungssystem das System in Minneapolis-St. Paul (Minnesota), das Ende 1969 Jahre eingeführt wurde (Anderson und Callery, 1974). Weitere US-amerikanische Städte, die in der Folge Steuerungssysteme implementierten waren Seattle (Washington), Lima (Ohio) und Cleveland (Ohio). In Europa setzte das Interesse an Kanalnetzsteuerungen etwas später ein. In Deutschland wurden erste Machbarkeitsstudien in den 70er Jahren durchgeführt.

Von Anfang an wurden Abflusssteuerungen von Kanalnetzbetreibern teils skeptisch beurteilt, es fehlte an der Akzeptanz der Technologie und der Bereitschaft, in komplexere Systeme zu investieren. Schilling (1986b) berichtet zum Beispiel von Betriebsfachleuten, die argumentieren, dass ein automatisches Programm zur Abflusssteuerung einem Menschen mit dessen Betriebserfahrung immer unterlegen ist. Englmann et al. (1986) zitieren einen beteiligten Diskussionsteilnehmer, der Abflusssteuerungen als „cannot-engineering“ bezeichnete. Sie berichten, dass die Einführung von Steuerungssystemen in den USA gemessen an dem Raum, die der operationelle Betrieb von wasserwirtschaftlichen Systemen in der wasserwirtschaftlichen Diskussion einnahme, schleppend erfolge. Gründe lägen weniger in technischen Problemen, als in politischen (Investitions-, aber keine Betriebsbeihilfen), administrativen (Trennung von Wassergüte- und mengenwirtschaft auch bei Mischsystemen) und organisatorischen Bereichen (mangelnde Integration von Planung, Entwurf und Betrieb). In manchen Fällen fehlt auch heute noch das Wissen um die Möglichkeiten der Abflusssteuerung. In Verbindung mit der häufig anzutreffenden

pauschalen Vorverurteilung der Abflusssteuerung wird diese Sanierungsalternative somit ohne fallspezifische Untersuchung bereits vorab verworfen (Erbe et al., 2009). Das Misstrauen in ein derart technisches System greift auch Grüning (2008) auf, der zu weiteren Anwendungen von Abflusssteuerungen anregen will, da seiner Einschätzung nach praktisch jedes Entwässerungssystem steuerungswürdig ist, wenn gebietsvariable Niederschläge und variable Kläranlagenbelastungen berücksichtigt werden. Er erläutert allerdings auch, dass in vielen Fällen eine solide Datenbasis für den ordnungsgemäßen Betrieb einer Steuerung fehlt. Potenzial sieht er vor allem durch die Einbindung von Online-Messungen der Gewässergüte.

Es ist unbestritten, dass die Implementierung einer Abflusssteuerung sehr hohe Anforderungen an die Planung und den Betrieb stellt. Die Steuerung des Abflussgeschehens setzt in der Regel eine umfangreichere Elektro-, Mess-, Steuer-, Regel- und Nachrichtentechnik voraus, als es in einem ungesteuerten Kanalnetz der Fall ist (Haas et al., 2009). Problematisch ist aber nicht nur die Komplexität des Gesamtsystems sondern auch die der einzelnen Komponenten. Vor allem die Zuverlässigkeit der Messorgane ist im Betrieb durch die extremen Bedingungen im Kanal häufig problematisch (Grüning et al., 2001), die Überwachung und Steuerung in Kanalnetzen hinkt denen der Abwasserbehandlung wegen der komplizierten Mess- und Datenübertragungstechnik und der ungenauen Informationen über den Systemzustand hinterher. Da in dieser Arbeit die mit den Steuerungsalgorithmen verbundenen Methoden zur Simulation und Optimierung im Mittelpunkt stehen, soll hier nicht weiter auf die betrieblichen Probleme eingegangen werden. Grundlegende Informationen zum Einsatz von Messeinrichtungen, deren Anforderungen und Anwendungsgrenzen sind in Geiger (1986), Schilling (1990), Fahrner (1996), Dittmer (2008), Kraus (2008) sowie Pfeffer und Haas (2010) gegeben. Regel- und Steuerungsorgane für die Abflusssteuerung sind in Schilling (1990), Dohmann und Weyand (1990), Fahrner (1996), Weyand (2001) sowie Campisano und Modica (2002) beschrieben.

Trotz aller Skepsis und Probleme - Darsono und Labadie (2007) stellen fest, dass weitere Anwendungen in der Praxis trotz einiger ermutigender Beispiele wegen Schwierigkeiten mit der Robustheit und Zuverlässigkeit der erforderlichen MSR-Infrastruktur sowie inadäquater Computerprogramme und Modellierungskapazitäten selten sind - gibt es einige erfolgreiche Umsetzungen, die beweisen, dass Abflusssteuerung bei entsprechendem Steuerungspotenzial sinnvoll und erfolgreich anwendbar ist. Weyand et al. (2000) listen mehrere Projekte auf, bei denen Investitionskosten in der Höhe von mehreren Millionen Euro eingespart wurden. Einen Überblick über die ersten Umsetzungen von Abflusssteuerungssystemen in den USA geben Schilling (1986a) und Schilling (1986b). Einen weltweiten Überblick gibt IAWPRC (1989), eine aktuellere Übersicht ist in Schütze et al. (2002a) enthalten. Steuerungssysteme in Deutschland wurden durch Weyand et al. (2000), Erbe (2002) und die DWA-Arbeitsgruppe „Abflusssteuerung in Kanalnetzen“ zusammengestellt (DWA, 2005). Hier sind insgesamt 36 umgesetzte Planungsmaßnahmen aufgeführt, die meisten davon in Nordrhein-Westfalen.

Bei Recherchen zum Thema Abflusssteuerung lässt sich grundsätzlich feststellen, dass viele Veröffentlichungen zur Abflusssteuerung in Kanalnetzen existieren. Die vollständige Beurteilung und die Einordnung der jeweiligen Arbeit sind jedoch aus den folgenden Gründen nicht immer einfach bzw. nicht möglich:

-
- Es sind keine weitergehenden Informationen über Steuerungsalgorithmen und –ziele gegeben. Dies ist häufig der Fall, wenn über Betriebserfahrungen von realen Steuerungssystemen berichtet wird und somit ein vertieftes Wissen über die zu Grunde liegenden Algorithmen eventuell nicht vorhanden ist.
 - Es handelt es sich lediglich um lokale Steuerungen, d.h. es liegt gar keine Verbundsteuerung vor und die Arbeit ist somit in diesem Kontext von geringer Bedeutung.
 - Bei einigen beschriebenen Fallbeispielen werden zwar reale Kanalnetze betrachtet, es wird aber nicht deutlich, ob die Steuerung tatsächlich in Betrieb genommen wurde. In einigen Fällen handelt es sich um zeitlich befristete Pilotprojekte, die entwickelten Systeme wurden dann aber nicht in den laufenden Betrieb übernommen.

Im Folgenden werden mit den Steuerungssystemen von Dresden und Quebec die derzeit maßgeblichen Projekte kurz dargestellt, über die ausreichende Informationen publiziert wurden und die einen guten Überblick über die derzeitigen tatsächlichen Möglichkeiten der Abflusssteuerung in der Praxis geben.

Das umfassendste Steuerungsprojekt in Deutschland ist die Verbundsteuerung der Stadt Dresden (Männig, 2006). Hier wurde im Jahr 2002 eine Abflusssteuerung mit dem Ziel eingeführt, die Entlastungsfrachten um mehr als 50 % zu reduzieren. Insgesamt sind in Dresden mehr als ein Dutzend Steuerungseinrichtungen in Betrieb, die ein Gesamtspeichervolumen von über 91.200 m³ bewirtschaften. Es handelt sich um eine regelbasierte Steuerung auf Basis der Software Hystem-Extran bzw. Control, die durch die Firma itwh in Verbindung mit der Stadtentwässerung Dresden implementiert wurde. Die Regelbasis für die Steuerung umfasst mehr als 800 Regelsätze, die mit Hilfe eines auf Fuzzy-Logik arbeitenden Regelinterpreters verarbeitet werden. Die Gesamtbaukosten für die Implementierung der Steuerung betrugen ca. 40 Mio. Euro, lagen damit allerdings deutlich unter denen der Alternative Beckenbau (100 Mio. Euro). Nach Angaben der Stadt Dresden übersteigen die Betriebskosten ebenfalls nicht die, welche für die Wartung von Regenüberlaufbecken erforderlich wären, so dass insgesamt bislang ein positives Fazit gezogen wird.

In Kanada betreibt die Stadt Quebec in Verbindung mit der Firma BPO-CSO seit 1999 ein Steuerungssystem, das auf einem modellprädiktiven Steuerungsalgorithmus basiert (Pleau et al. (2001) und Pleau et al. (2005)). Ziel der Steuerung ist es, die Mischwasserentlastungen in den Sankt-Lorenz-Strom, der in der Stadt abschnittsweise als Naherholungsgebiet genutzt wird, auf maximal zwei Entlastungsereignisse pro Sommerperiode zu minimieren. Insgesamt werden fünf Steuerungsorgane betrieben, die ein kontrollierbares Gesamtspeichervolumen von 15.000 m³ bewirtschaften. Die Berechnung der optimalen Steuerungseinstellungen basiert auf einem nicht-linearen Optimierungsverfahren und einem vereinfachten Abflussmodell mit einer linearen Übertragungsfunktion. Das Modell wird anhand von gemessenen und berechneten Abflusswerten (eines simultan laufenden nicht-linearen hydraulischen Modells) mittels eines Kalman-Filters online kalibriert. Im Vergleich zum ungesteuerten Referenzsystem, d.h. der Situation vor der Implementierung der Steuerung, konnten die Entlastungsereignisse um 60 % reduziert werden.

2.4.1. Abflusssteuerung in der Forschung

Aufgrund der fortwährend bestehenden Schwierigkeiten im Betrieb ergibt sich automatisch ein dementsprechender Forschungsbedarf, vor allem bei den Messinstrumenten. Gesucht sind hier robuste Geräte, die in der Lage sind, bei den widrigen Verhältnissen im Kanal kontinuierliche Abfluss- und Stoffmessungen durchzuführen. Die diesbezüglichen Forschungen werden hier nicht weiter beleuchtet, es sei aber erwähnt, dass es gerade auf dem Gebiet der online-Stoffmessungen einige Projekte gibt, in denen die Entwässerungsplaner mit den Geräteherstellern eng zusammenarbeiten (Gruber et al. (2006), Grüning und Hoppe (2008)).

Dass es sich bei der Abflusssteuerung um angewandte Forschung handelt, spiegelt sich aber auch in den eher theoretischen Arbeiten wieder, die sich mit den Berechnungsmethoden beschäftigen, die den Steuerungsalgorithmen zu Grunde liegen. Wesentliche Impulse kommen auch hier aus der Praxis: Einerseits führen Veränderungen bei den gesetzlichen Anforderungen hin zur immissionsorientierten Bewertung von Entwässerungssystemen zu Verschiebungen bei den Steuerungszielen und somit zur Notwendigkeit, entsprechende Simulationsmodelle zur Verfügung zu stellen. Andererseits investiert die Industrie in Forschungsprojekte zur modellprädiktiven Steuerung, da dieses Verfahren in anderen Sektoren seit einer Weile erfolgreich eingesetzt wird und hier der Wunsch besteht, bereits existierende Infrastruktur synergetisch zu nutzen. Diese Entwicklung wird dadurch unterstützt, dass erst seit kurzer Zeit die Rechenleistungen von Computern zur Verfügung stehen, die eine Umsetzung dieser Verfahren überhaupt ermöglichen. Bei den wissenschaftlichen Arbeiten kristallisieren sich seit einiger Zeit somit zwei Schwerpunkte heraus: Die integrierte bzw. immissionsorientierte Steuerung und die modellprädiktive Steuerung in Entwässerungssystemen. Obwohl im Rahmen dieser Arbeit die modellprädiktive Steuerung im Vordergrund steht, wird im Folgenden der Stand der Wissenschaft beider Themen dargestellt.

Integrierte und immissionsorientierte Steuerung

Harremoes (1991) war einer der ersten, der forderte, dass auch die Methode der Abflusssteuerung im Kontext des gesamten Entwässerungssystems betrachtet werden muss. Das Potenzial der integrierten Steuerung wurde von Harremoes et al. (1994) beschrieben. Sie entwarfen ein Steuerungssystem für das Entwässerungssystem der Stadt Aalborg, bei welchem Steuerungsentscheidungen in Abhängigkeit von Kanalnetzabflüssen und der hydraulischen Kapazität auf der Kläranlage getroffen werden und die Steuerungsziele auf der Basis von Sauerstoffuntersuchungen am Gewässer entwickelt wurden.

Eine Definition des Begriffes der integrierten Steuerung liefern Schütze et al. (1999). Demnach kann von integrierter Steuerung gesprochen werden, wenn sowohl eine Integration hinsichtlich der Steuerungsziele als auch hinsichtlich der Informationen erfolgt:

- Integration der Ziele bedeutet, dass die Steuerungsziele in einem Teilsystem auf Zuständen basieren, die in einem anderen Teilsystem gemessen werden (z.B. Pumpen im Kanalnetz werden gesteuert, um das Sauerstoffdefizit im Gewässer zu verringern).

-
- Integration der Informationen bedeutet, dass die Steuerungsentscheidungen in einem Teilsystem auf Informationen basieren, die in einem anderen Teilsystem ermittelt wurden (z.B. wenn Ablaufkonzentrationen der Kläranlage bei der Steuerung des Kanalnetzes berücksichtigt werden).

Meirlaen (2002) führte später den Begriff der immissionsorientierten Steuerung ein. Eine bindende Abgrenzung beider Begriffe existiert nicht, da auch Meirlaen (2002) sich auf die Steuerung des gesamten Entwässerungssystems - bestehend aus Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer - bezieht. Eine Begriffsabgrenzung erscheint allerdings sinnvoll, da in der Zwischenzeit eine Reihe von Arbeiten unter dem Titel „integrierte Steuerung“ veröffentlicht wurden, die mit Kanalnetz und Kläranlage lediglich zwei Komponenten des urbanen Entwässerungssystems berücksichtigen. Sinnvoll erscheint daher folgende Festlegung: Der Begriff immissionsorientierte Steuerung sollte dann verwendet werden, wenn als Steuerungsziel Kennwerte im Gewässer zugrunde gelegt werden. Der Begriff der integrierten Modellierung sollte verwendet werden, wenn nur die Komponenten Kanalnetz und Kläranlage berücksichtigt werden, d.h. bezogen auf die Steuerungsziele handelt sich hierbei um eine schmutzfrachtbasierte Steuerung (siehe Kapitel 2.1.3).

Entsprechend dieser Unterscheidung ist die Zielgröße bei der integrierten Steuerung die Minimierung der Gesamtemissionen aus Kanalnetz und Kläranlage. Diesbezügliches Potenzial birgt hierbei vor allem die dynamische Regelung des Kläranlagenzulaufs, die in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Kapazitäten eine Erhöhung der Zuflüsse über den statisch dimensionierten Zulaufwert ermöglicht. Da solche Verfahren bereits in der Praxis implementiert wurden bzw. im Betrieb sind (z.B. Schilling et al. (1996) und Wiese et al. (2005)), können sie praktisch auch als Stand der Technik bezeichnet werden kann. Weitere diesbezügliche Untersuchungen, entweder als Simulationsstudie oder im großtechnischen Versuch, wurden von Seggelke (2002), Scheer et al. (2004), Nielsen et al. (1996), Risholt et al. (2002), Seggelke et al. (2009), Wiese et al. (2005) und Hilmer (2008) durchgeführt.

Die Notwendigkeit zur immissionsbasierten Betrachtung haben Rauch und Harremoes (1998) aufgezeigt, in dem sie ermittelten, dass die Reduktion von Mischwasserentlastungen durch Steuerungsmaßnahmen keine Korrelation mit der Sauerstoffkonzentration im Gewässer besitzt. Schütze et al. (1999) konnten ebenfalls nachweisen, dass sich durch integrierte Steuerung eine zusätzliche Verbesserung der Sauerstoffkonzentrationen im Gewässer gewährleistet werden kann. Krebs und Rauch (2002) ermittelten Steuerungspotenzial, das sich aus den Tagesgängen der Ammoniumfrachten im Trockenwetter ergibt.

Einen umfassenden Überblick über die Anforderungen für die Umsetzung von immissionsbasierten Steuerungen liefern Harremoes und Rauch (1999) sowie Krebs und Rauch (2002). Simulationsbasierte Untersuchungen von immissionsbasierten Steuerungen wurden von Rauch und Harremoes (1999), Schütze et al. (1999), Frehmann et al. (2002), Meirlaen et al. (2002), Butler und Schütze (2005), Erbe und Schütze (2005) und Vanrolleghem et al. (2005) durchgeführt. Mit der Ausnahme der Arbeit von Rauch und Harremoes (1999) handelt es sich durchweg um regelbasierte Steuerungen. Die meisten dieser Arbeiten verwenden für die Untersuchungen zwar Daten von realen Entwässerungssystemen. Umsetzungen solcher komplexer Systeme, die alle drei Komponenten des urbanen Entwässerungssystems berücksichtigen, z.B. im Rahmen eines großtechnischen

Versuchs, erfolgten jedoch bislang nicht. Im Wesentlichen lässt sich dies an zwei Punkten festmachen:

- Für die Entwicklung von Steuerungsmaßnahmen ist die Verwendung von parallel rechnenden integrierten Simulationsmodellen unter Berücksichtigung der drei Teilsysteme Kläranlage, Kanalnetz und Gewässer unumgänglich, da die Steuerungsoptionen nicht experimentell oder auf Grund von Erfahrung beurteilt werden können. Selbst die Verwendung von solchen Modellen ohne Steuerungsoptionen ist jedoch in der Praxis nicht weit verbreitet.
- Die Entwicklung von Messgeräten schreitet zwar voran, die Online-Messung von Güteparametern in Fließgewässern für den langfristigen Einsatz in der Echtzeitsteuerung ist allerdings weiterhin noch nicht praxistauglich.

Zwischen den volumenbasierten Abflusssteuerungen und immissionsorientierter Steuerung liegt also eine signifikante Steigerung der Komplexität, die sich nur lohnt, wenn nachgewiesen werden kann, dass mit einer integrierten Steuerung die Gewässergüte deutlich verbessert werden kann (Krebs und Rauch, 2002). Die Anforderungen, die sich an integrierte Simulationsmodelle für die immissionsbasierte Steuerung ergeben (einen Überblick über bestehende Simulationsmodelle gibt Kap. 2.3.3.), müssen sich letztlich an den Steuerungszielen orientieren, die sich aus den rechtlichen Vorgaben ergeben. Im Mittelpunkt stehen hier neben der hydraulischen Belastung die Sauerstoff- und die Stickstoffkonzentrationen im Gewässer, die als Leitparameter zur Bewertung der Gewässergüte dienen.

Um diese Kenngrößen mit Hilfe von Simulationsmodellen bewerten zu können, sind vereinfachte Modellierungsansätze, welche die ablaufenden Prozesse nicht in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung modellieren und in der Berechnung von Summengrößen münden, nicht zielführend. Nach Krebs und Rauch (2002) ist es in solchen Fällen dagegen von entscheidender Bedeutung,

- ob eine Entlastung während einer frühen oder einer späten Phase des Ereignisses stattfindet, da der Niederschlags-Abfluss-Prozess im Einzugsgebiet des Fließgewässers langsamer vor sich geht und damit die Verdünnungskapazität des Gewässers erst im Verlauf der Ereignisse zunimmt,
- ob die CSB-Fracht aus der Mischwasserentlastung oder aus dem Kläranlagenablauf stammt, da der Anteil des leicht abbaubaren CSB im entlasteten Mischwasser wesentlich größer ist als im Kläranlagenablauf und
- dass bei kleinen, sensiblen Gewässern auch die Dynamik und Charakteristik des Fließgewässers berücksichtigt werden kann.

Um diesen Anforderungen zu genügen, müssen die Simulationsmodelle in der Lage sein, die Prozesse und die Zustandsgrößen im gesamten Entwässerungssystem in der entsprechenden Genauigkeit abzubilden. Für die hydraulische Modellierung bedeutet dies, dass ausschließlich hydrodynamische Modelle in der Lage sind, Ergebnisse in der geforderten Genauigkeit zu liefern. Krebs et al. (1999) haben z.B. gezeigt, dass Ausstoßf-

fekte zur Abschätzung der Spitzenfrachten von gelösten Schmutzstoffen (wie z.B. Ammonium) nur mit hydrodynamischen Modellen erfasst werden können.

Dass immissionsorientierte Steuerungen nicht nur wissenschaftliche Gedankenspiele sind, wird durch zwei jüngere Forschungsarbeiten verdeutlicht, die in enger Kooperation mit lokalen Interessensvertretern ausgeführt werden. Beide Projekte verwenden Gütemessungen im Fließgewässer zur Steuerung der Regen- bzw. Mischwasserströme in einem weniger komplexen System, d.h. durch Untersuchung eines kleineren Ausschnitts des Entwässerungssystems ohne die Berücksichtigung der Kläranlage. Muschalla et al. (2009) untersuchen die Auswirkungen der Steuerung eines Regenrückhaltebeckens auf die Gewässergüte an einem kleinen Fließgewässer in der Provinz Quebec in Kanada, Grüning (2009) untersucht die Verwendung von spektrometrischen Online-Messungen zur Steuerung von Regenwasserströmen.

Modellprädiktive Steuerung

Der Einsatz von Simulationsmodellen und mathematischen Optimierungsverfahren zur Ermittlung von Steuerungsentscheidungen im laufenden Betrieb wird in Fachzeitschriften erstmals in den 70er Jahren in den USA erwähnt (Anderson (1970), Gibbs et al. (1972), Brandstetter et al. (1973), Anderson und Callery (1974), Brueck et al. (1981)). Es handelt sich um Veröffentlichungen von privaten Institutionen, d.h. entweder von Kanalnetzbetreibern oder von diesen beauftragten privatwirtschaftlichen Firmen, die durch den ‚Clean-Water-Act‘ gezwungen waren, die negativen Auswirkungen der Mischwassereinleitungen auf die Gewässer deutlich zu verringern. Obwohl bereits frühzeitig erkannt wurde, dass letztlich die Verbesserung der Gewässergüte im empfangenden Gewässer als Steuerungsziel dienen sollte (Patry, 1983), wurde als Steuerungsziel auf Grund der seinerzeit noch nicht zur Verfügung stehenden Berechnungsansätze zunächst ausschließlich die Verminderung von Entlastungsabflüssen betrachtet.

An der Colorado State University begann eine Gruppe von Wissenschaftlern Mitte der 70er Jahre mit Untersuchungen zu modellprädiktiven Steuerungen. Aufgrund der geringen Rechenkapazitäten der damals zur Verfügung stehenden Computer bauten ihre Untersuchungen auf einem hierarchischen System auf, bei denen das gesamte Kanalnetz in mehrere Teilgebiete unterteilt wurde, für die dann einzelne Optimierungsprobleme formuliert wurden. Auf einer übergeordneten Ebene wurden die einzelnen optimierten Steuerungslösungen dann mit einem iterativen Verfahren zu einer Gesamtlösung optimiert. Für die Lösung der Teilprobleme wurden Verfahren der dynamischen Programmierung (Labadie et al. (1974) und Trotta et al. (1977)) sowie der linearen Optimierung (Labadie et al., 1975) eingesetzt. Für die Abflussberechnung wurde ein lineares Muskingum-Verfahren verwendet, da nur hierdurch überhaupt die Anwendung der Optimierungsverfahren ermöglicht werden konnte. Die Problematik wurde von Trotta et al. (1977) prägnant dadurch beschrieben, dass die Umstände der Echtzeitsteuerung Einschränkungen für die Optimierungsverfahren mit sich bringen, die wiederum zu Einschränkungen bei der möglichen Komplexität der Abflussberechnung führen. Einige Jahre später entwickelte Patry (1983) an der University of California in Davis ein Steuerungssystem mit einem linearen Optimierungsverfahren, bei dem der Schwerpunkt auf der Implementierung von

Regenüberlaufbecken im Nebenschluss liegt, deren Einsatz in Mischwassernetzen seinerzeit noch selten war.

Mit der Kombination des zeitdiskreten Maximum-Prinzips und einem Gradientenverfahren setzte Papageorgiou (1983, 1985) ein leistungsfähigeres Optimierungsverfahren ein, das es ermöglichte, größere Systeme zu optimieren, ohne dieses in Teilnetze unterteilen zu müssen. Die Abflussberechnung erfolgte allerdings auch bei seinen Arbeiten durch Totzeitverschiebung, also durch eine reine Translation der Abflusswelle.

Zwei Jahre später veröffentlichte er seine Arbeit in Deutschland (Papageorgiou et al., 1987) und untersuchte die Einflüsse von Steuerungszeitschritt sowie Optimierungs- und Vorhersagehorizont auf die Qualität der Steuerungsergebnisse. Etwa zeitgleich veröffentlichte Schilling (1987) eine umfassende Beschreibung von Anforderungen an die Abflusssteuerung in Planung und Praxis. Er stellte damit als Erster verschiedene Steuerungstypen, -ziele und -algorithmen zusammen und zeigte anhand eines fiktiven Fallbeispiels die Möglichkeiten der linearen Optimierung für die Echtzeitorientierung auf.

Die Einschränkung, für die Abflussberechnung ein vereinfachtes Simulationsmodell verwenden zu müssen, wurde von Zunic (1991) dadurch überwunden, dass er für die Optimierung Evolutionsstrategien und damit ein direktes Optimierungsverfahren einsetzte. Die Abflussberechnung erfolgte mit einem hydrodynamischen Modell unter Ansatz der vollständigen St.-Venant-Gleichungen, für die Lösung verwendete er allerdings ein Charakteristikenverfahren, das für die Berechnung von Kanalnetzen nur bedingt geeignet ist. Der Schwerpunkt seiner Arbeit lag in der Vermaschung von Kanalnetzen in Verbindung mit der Abflusssteuerung, das Verfahren testete er an Hand eines vereinfachten Kanalnetzes der Stadt München mit weniger als 100 Haltungen.

Meßmer und Papageorgiou (1992) legten bei ihren Untersuchungen die Strategie zugrunde, das vorhandene Speichervolumen im Kanalnetz möglichst gleichmäßig auszunutzen und verwendeten hierfür das Prinzip eines linearen Mehrgrößenreglers. Die Abflussberechnung erfolgte dementsprechend über eine einfache Totzeitverschiebung bzw. über eine lineare Translation.

In den nächsten Jahren wurden weitere Arbeiten publiziert, die alle für die Abflussberechnung einfache lineare Verfahren verwenden und sich somit lediglich durch die Optimierungsalgorithmen unterscheiden: Nelen (1992) entwickelte eine Software, die für die Optimierung die lineare Programmierung verwendet. Im Mittelpunkt dieser Arbeit sowie der Veröffentlichung von Jorgensen et al. (1995), die mit der gleichen Software arbeiteten, stand die Analyse des Steuerungspotenzials von Entwässerungsnetzen. Rohlfing (1994) verwendete ebenfalls die lineare Programmierung als Optimierungsverfahren, die Abflussberechnung erfolgt durch eine einfache Fließzeitverschiebung. An Hand von zwei Fallbeispielen untersuchte er den Einfluss des Berechnungshorizontes, des Vorhersagehorizontes sowie der Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Anfangsbedingungen. Gelormino und Ricker (1994) benutzten für die Prozessmodellierung ein Linearspeichersystem, woraus sich ein quadratisches Optimierungsproblem ergibt. Auch sie untersuchten den Einfluss von Optimierungs- und Vorhersagehorizont auf die Steuerungsergebnisse.

Garcia (1996) entwickelte ein hybrides Verfahren aus einem regelbasierten und einem modellprädiktiven Algorithmus, bei dem die Anfangsbedingungen für die modellprädiktive Steuerung durch die Regelbasis definiert werden. Die Abflussberechnung erfolgt durch das hydrodynamische Simulationsmodell MOUSE. Für die Optimierung im modellprädiktiven Prozess setzt er ein direktes ableitungsbasiertes Verfahren ein, in dem die Gradienten iterativ durch numerische Approximation ermittelt werden (d.h. in jedem Iterationsschritt ist eine Simulation zur Ermittlung des Gradienten erforderlich).

Pleau et al. (1996) bzw. Methot und Pleau (1997) verwendeten einen nicht-linearen Optimierungsalgorithmus und koppelten diesen ebenfalls mit einer linearen Abflussberechnung. In ihren Untersuchungen verwenden sie aber darüber hinaus einen Kalman-Filter, der eine Anpassung der Abflüsse des linearen Modells an ein parallel laufendes nicht-lineares hydraulisches Modell ermöglicht und somit eine robustere und genauere Grundlage für die Optimierung liefert. Die Arbeit lieferte die Grundlage für weitere praxisnahe Entwicklungen, die schließlich in dem oben genannten Steuerungssystem der Stadt Quebec mündeten, welches seit längerer Zeit erfolgreich zum Einsatz kommt. Pleau et al. (1996) weisen allerdings darauf hin, dass die Modellierung von Rückstauwirkungen in flachen Kanalnetzen Schwierigkeiten bereitet. Diese Tatsache veranlasste offensichtlich die Untersuchungen von Duchesne et al. (2001, 2004), die das nicht-lineare Modell erweiterten, so dass hiermit Druckabfluss und Rückstauwirkungen berücksichtigt werden können.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes, bei dem Fokus auf der Einbindung radargemessener Niederschläge lag, wurde von mehreren Autoren ein Steuerungsalgorithmus entwickelt, der auf der Kopplung von regelbasierten und modellprädiktiven Systemen basierte (Cassar und Redder (1997), Pfister et al. (1999), Pfister und Cassar (1999)). Sie verwendeten ein hydrodynamisches Modell, um die zu erwartenden Zuflussganglinien zu berechnen. In Verbindung mit den prognostizierten Regenradardaten wurde dann die Zielfunktion an Hand einer Regelbasis festgelegt, wodurch Schmutzfrachten in der Kanalisation und die Gewässergüte im empfangenden Gewässer berücksichtigt werden konnte. Die eigentliche Entscheidungsfindung für die Steuereinstellung erfolgte dann auf Basis eines linearen Optimierungsproblems.

Rauch und Harremoes (1999) gingen in ihrer Arbeit erstmals über die abflussbasierte Steuerung hinaus und untersuchten den Einsatz der modellprädiktiven Steuerung für die immissionsorientierte Steuerung. Als Fallbeispiel diente ein einfaches fiktives System. Die Abflussberechnung erfolgte mit einem einfachen Translationsmodell, für die Optimierung wurden genetische Algorithmen eingesetzt.

Mit der „generellen reduzierten Gradientensuche“ verwendeten Cembrano et al. (2004) ein ableitungsbasiertes Optimierungsverfahren, das mit einer linearen Übertragungsfunktionen für die Prozessmodellierung gekoppelt wurde. Das Verfahren wurde an Hand eines vereinfachten Modells des Kanalnetzes von Barcelona getestet, wobei ähnlich wie in Quebec ein Algorithmus zum Fehlerabgleich zwischen modellierten und gemessenen Abflusswerten entworfen wurde. Martínez Ocampo (2007) verwendete später das gleiche System, um die Fehlertoleranz bei der modellprädiktiven Steuerung zu untersuchen.

Mit einem Gradientenverfahren und einem linearen Mehrgrößenregler, beide gekoppelt mit einer linearen Übertragungsfunktion, untersuchten Marinaki und Papageorgiou (2005) die Leistungsfähigkeit von zwei verschiedenen Optimierungsverfahren. Die von ihnen verwendete Software baut auf der oben genannten Arbeit von Meßmer und Papageorgiou (1992) auf. Mit der gleichen Software arbeitet auch Scheer (2008), die in ihrer Arbeit die Wirkungen von Abflusssteuerungsmaßnahmen auf verschiedene Komponenten des urbanen Entwässerungssystems untersucht. Meßmer und Papageorgiou (2009) erweiterten später den Ansatz, in dem sie für die Abflussberechnung einen Diffusionswellenansatz verwenden. Für die Optimierung setzen sie ein ebenfalls ein Gradientenverfahren ein, bei dem die Ableitungen analytisch ermittelt werden.

Eine kommerzielle Software mit entsprechender grafischer Eingabeunterstützung stellten Pirsing et al. (2006) vor, welche für die Optimierung die „Sequentielle Quadratische Programmierung“ verwendet. Hierbei handelt es sich um ein nicht-lineares Verfahren, bei dem die Ableitungen analytisch ermittelt werden, das aber mit einem vereinfachten Ersatzmodell für die Abflussberechnung arbeitet.

Die Implementierung eines modellprädiktiven Steuerungssystems ist in Luxemburg am Obersauer-Kanalnetz geplant. Das weitläufige Kanalnetz, in dem mehrere Gemeinden miteinander über Pumpenanlagen verbunden sind, wird derzeit gebaut, so dass hier die Anwendung der Steuerung von Beginn an in die Planungen eingebunden werden konnten (Gille et al. (2008); Schutz et al. (2009)). Auch hier erfolgt die Abflussmodellierung vereinfacht linear, für die Optimierung wird eine quadratische Zielfunktion formuliert.

2.4.2. Zusammenfassung

Bei der Sichtung der realisierten Abflusssteuerungssysteme fällt auf, dass es sich (1) vorwiegend um abflussbasierte Steuerungen und (2) in den meisten Fällen um Offline-Steuerungen handelt. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich daher vorwiegend mit zwei Themen: Immissionsorientierte Steuerungen und modellprädiktive Steuerungen.

Dass die Kombination beider Prinzipien – die modellprädiktive Steuerung mit immissionsorientierten Steuerungszielen – grundsätzlich möglich ist, wurde durch Rauch und Harremoes (1999) anhand eines fiktiven Entwässerungssystems unter Verwendung eines einfachen Translationsansatzes für die Abflussberechnung im Kanal und im Gewässer gezeigt. Auch wurden immissionsorientierte Offline-Steuerungen in den letzten Jahren auf der Basis theoretischer Beispiele häufiger untersucht. Die praktische Umsetzung von immissionsorientierten Steuerungssystemen unter Berücksichtigung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer ist allerdings aufgrund des großen konzeptionellen und praktischen Aufwands derzeit noch nicht möglich.

Mit Ausnahme der Untersuchung von Rauch und Harremoes (1999) beschränken sich modellprädiktive Steuerungen von jeher auf abflussbasierte Steuerungsziele. Bei den ersten Projekten, die in den 70er Jahren in den USA initiiert wurden, war die Verwendung von hydraulischen Simulationsmodellen noch nicht üblich. Die Vorgehensweise war daher durch Optimierungsverfahren geprägt, die in der Lage waren, innerhalb des Steuerungszeitschritts optimale Steuerungsentscheidungen zu berechnen. Das effektivste Verfahren

war hierfür die lineare Optimierung, die aber automatisch mit entsprechenden Einschränkungen für die Prozessmodellierung verbunden ist. In der Folgezeit wurden weitere indirekte Optimierungsmethoden eingesetzt, die jedoch immer mit (teilweise stark) vereinfachten Modellansätzen für die Abflussberechnung gekoppelt wurden.

Mit dem zunehmenden Einsatz von Simulationsmodellen für herkömmliche Planungen rückte eine zweite Sichtweise in den Vordergrund, so dass man mittlerweile bei modellprädiktiven Abflusssteuerungen zwischen zwei Vorgehensweisen unterscheiden kann: Auf der einen Seite stehen die mathematisch geprägten Systeme, bei denen das Optimierungsverfahren im Mittelpunkt steht. Verwendet werden hierbei indirekte Optimierungsverfahren und analytische Modelle, die den unmittelbaren Zugriff auf die Prozessgleichungen zur Abflussberechnung ermöglichen. Neben der linearen Programmierung – die per Definition globale Optima ermittelt, aber ausschließlich lineare Prozessmodelle unterstützt – handelt es sich bei den indirekten Optimierungsverfahren immer um ableitungsbasierte und damit lokale Methoden. Auf der anderen Seite steht die ingenieurtechnische Herangehensweise, bei der das Simulationsmodell im Mittelpunkt steht und als Black-Box für die Zielfunktionsauswertung verwendet wird. Bei dieser sogenannten direkten Optimierung können aufgrund der strikten Trennung zwischen Optimierungsverfahren und Prozessmodellierung sowohl lokale als auch globale Optimierungsmethoden eingesetzt werden.

Lediglich Zunic (1991) und Garcia (1996) setzten bislang hydrodynamische Berechnungsansätze für die modellprädiktive Steuerung ein. Beide verwendeten hierfür direkte Optimierungsverfahren. Zunic setzte für die numerische Lösung der St.-Venant-Gleichungen ein Charakteristikenverfahren ein. Diese Methode ist für die Berechnung von Kanalnetzen allerdings nur wenig geeignet, da die räumliche und zeitliche Diskretisierung durch die Charakteristiken selbst definiert wird. Somit können geometrische Änderungen des Fließquerschnitts, die im Kanalnetz an den Schächten im Prinzip willkürlich auftreten, nicht ohne weiteres berücksichtigt werden (Belke, 1992). Garcia verwendete in seiner Arbeit ein ableitungsbasiertes Verfahren, bei dem die Gradienten numerisch durch eine iterative Zielfunktionsauswertung ermittelt werden. Diese Vorgehensweise ist sehr rechenintensiv, da für jede Zielfunktionsauswertung eine Simulation mit dem hydrodynamischen Simulationsmodell erforderlich ist.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das Beispiel der Stadt Quebec zwar zeigt, dass die modellprädiktive Steuerung grundsätzlich erfolgreich eingesetzt werden kann. Die Verwendung von hydrodynamischen Berechnungsansätzen für die Prozessmodellierung ist in der Praxis bislang jedoch nicht üblich. Die Problematik der modellprädiktiven Abflusssteuerung lässt sich strukturieren, wenn man Optimierung und Prozessmodellierung gegenüber stellt und beide Aufgabengebiete noch einmal thematisch unterteilt (siehe Abbildung 2.10).

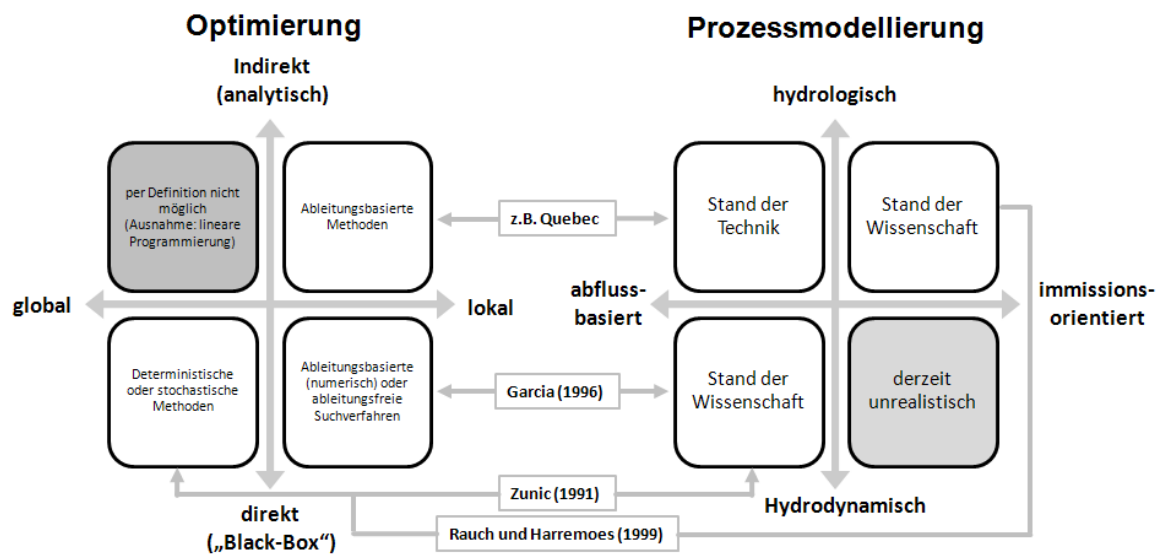


Abbildung 2.10: Übersicht über den Stand der Technik und der Wissenschaft in der modellprädiktiven Steuerung

2.5. Forschungsbedarf

In diesem Kapitel wurde bislang verdeutlicht, dass für die Abflusssteuerung in Entwässerungssystemen zwei Strategien einsetzbar sind: Offline-Steuerungen und modellprädiktive (online) Steuerungen. Die modellprädiktiven Steuerungen rücken durch fortschreitende Entwicklungen in der Computertechnologie und den damit verbundenen größeren Rechenleistungen immer mehr in den Mittelpunkt und werden verstärkt eingesetzt.

Ausgehend von aktuellen rechtlichen Anforderungen bilden immissionsbasierte Steuerungen zukünftig den Stand der Technik. Derzeit sind Umsetzungen von modellprädiktiven Steuerungen mit immissionsorientierten Zielen in realen Entwässerungssystemen aufgrund fehlender Rechenleistungen noch unrealistisch. Durch die immissionsorientierten Steuerungs- und Bewirtschaftungsziele wird allerdings deutlich, dass nur durch eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Betrachtung der Entwässerungssysteme die akuten Gewässerbeeinträchtigungen korrekt abgebildet werden. Zur realitätsnahen Abflussberechnung sind hydrodynamische Berechnungsverfahren erforderlich, da nur sie die Abflussdynamik ausreichend erfassen können.

Bereits vor längerer Zeit wurde nachgewiesen, dass hydrodynamische Verfahren auch erforderlich sind, wenn ausschließlich das Kanalnetz modelliert wird. So haben z.B. Verworn (1980) und Schmitt (1985) gezeigt, dass eine realitätsnahe Modellierung der Abflussvorgänge in flachen Kanalnetzen nur mit hydrodynamischen Modellen möglich ist. Vor allem flache Kanalnetze besitzen ein großes Steuerungspotenzial, so dass auch bei der abflussbasierten Steuerung hydrodynamische Modelle eingesetzt werden müssen. Nur so können Entlastungsabflüsse ausreichend genau berechnet werden. Diese Einschätzung wird auch von wissenschaftlichen Autoren geteilt (Duchesne et al. (2001); Duchesne et al. (2004)).

Es kann festgestellt werden:

-
- Es gibt es einen Bedarf an modellprädiktiven Steuerungssystemen mit hydrodynamischen Prozessmodellen.
 - Modellprädiktive Steuerungen für immissionsorientierte Ziele sind derzeit noch nicht einsetzbar.
 - Modellprädiktive Steuerungen mit abflussbasierten Zielen sind derzeit Gegenstand der Forschung.

Dem Autor sind lediglich zwei Forschungsarbeiten bekannt, bei denen modellprädiktive Steuerungen mit hydrodynamischen Berechnungsansätzen durchgeführt wurden. In beiden Fällen wurden direkte Optimierungsmethoden eingesetzt, d.h. das Simulationsmodell wurde als Black-Box für die Zielfunktionsauswertung verwendet. Ansätze zur Kopplung von indirekten Optimierungsmethoden mit hydrodynamischen Abflussmodellen für Kanalnetze wurden bislang nicht entwickelt.

Aus Sicht der angewandten Forschung ist vor allem die Frage der Rechenzeit von Interesse. Die Erfahrungen aus sämtlichen Projekten zeigen, dass bisher bei komplexen Systemen aus Rechenzeitgründen innerhalb des Steuerungszeitschritts keine optimalen Steuerungsentscheidungen gefunden werden können. Gesucht werden daher Möglichkeiten, dennoch hydrodynamische Ansätze für die Prozessmodellierung einsetzen zu können.

Auch wenn die praktische Umsetzung von immissionsorientierten Steuerungen noch nicht absehbar ist, wird in wissenschaftlichen Untersuchungen zu diesem Thema die Leistungsfähigkeit von lokalen und globalen Optimierungsmethoden diskutiert. Es ist zu untersuchen, ob globale Methoden im Vergleich zu den lokalen Methoden bessere Steuerungsentscheidungen finden und damit insgesamt ein besseres Steuerungsergebnis gewährleisten können. Aufgrund der unterschiedlichen Ansätze für die gleichzeitig zu simulierenden Teilsysteme Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer können die derzeit bekannten Modellierungsansätze für die integrierte Modellierung nicht mit indirekten Optimierungsverfahren gekoppelt werden. Daher können nur direkte Methoden für die immissionsbasierte Steuerung eingesetzt werden. Auch für abflussbasierte Steuerungen kommen ausschließlich direkte Optimierungsmethoden (Black-Box-Optimierung) in Frage, wenn globale Optima gefunden werden sollen.

Der Forschungsbedarf lässt sich durch die folgenden Fragen beschreiben:

- Liefern globale Methoden bei der Verwendung von direkten Optimierungsverfahren bessere Steuerungsergebnisse als lokale Methoden?
- Ist die modellprädiktive Steuerung mit hydrodynamischen Modellen auf der Basis indirekter Optimierungsverfahren möglich?
- Ist der Einsatz von hydrodynamischen Kanalnetzmodellen mit haltungsgenauen Daten für die modellprädiktive Steuerung in absehbarer Zeit möglich und wie können die Rechenzeiten vermindert werden?

3. Modellprädiktive Abflusssteuerung

Die modellbasierte prädiktive Regelung⁴ ist ein Verfahren, das in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts durch Regelungstechniker entwickelt wurde und zunächst vor allem im Raffineriesektor und der Petrochemie eingesetzt wurde. Grundsätzlich bezeichnet das Verfahren eine ganze Klasse an Regelungsmethoden, die auf der expliziten Nutzung eines Modells des zu regelnden Prozesses basieren, um mit diesem das Verhalten relevanter Prozessgrößen vorhersagen und in einer zu minimierenden Kostenfunktion bewerten zu können (Dittmar und Pfeiffer, 2004). Dass es sich bei dem Verfahren um eine Regelung – und nicht um eine Steuerung – handelt, verdeutlicht Abbildung 3.1 (vgl. hierzu auch Abbildung 2.1 in Kapitel 2.1).

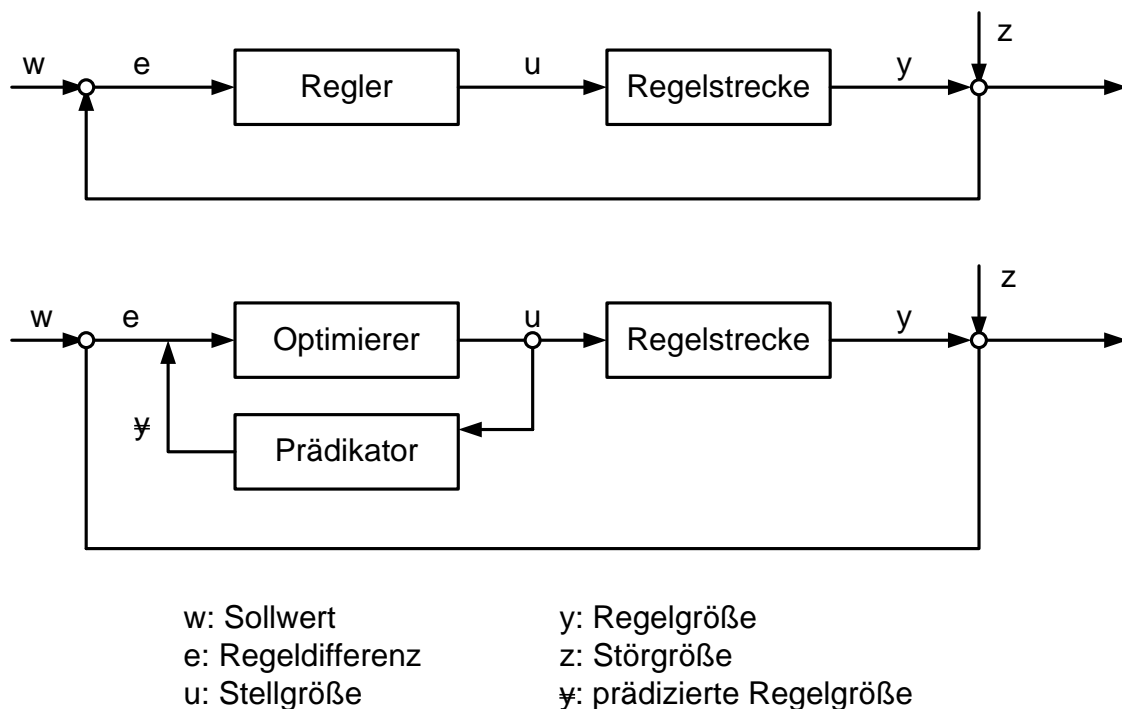


Abbildung 3.1: Klassischer Regelungskreis (oben) und modellprädiktive Steuerung (unten)

Das Verfahren hat seinen Ursprung im industriellen Umfeld und fand erst später Eingang in den universitären Bereich (Kroll und Abel, 2006). In den letzten Jahren hat die modellprädiktive Steuerung jedoch auch auf wissenschaftlicher Ebene eine große Aufmerksamkeit gefunden. Stützte sich anfangs der weitaus größte Anteil aller Anwendungen auf einfache lineare, empirische Modelle, sind mittlerweile Verfahren von zunehmendem Interesse, die nicht-lineare theoretische Prozessmodelle benutzen. In vielen Fachdisziplinen ist das Verfahren erfolgreich, weil es nicht nur dem Mehrgrößencharakter

⁴ In der Regelungstechnik wird das Verfahren als „modellprädiktive Regelung“ bezeichnet, in der Entwässerungsplanung hat sich der Begriff „modellprädiktive Steuerung“ durchgesetzt (siehe Kapitel 2.1.2). Der uneinheitliche Begriffsgebrauch lässt sich dadurch erklären, dass im deutschen Sprachgebrauch generell von „Kanalnetzsteuerung“ gesprochen wird und dass der englische Begriff „(model predictive) control“ sowohl als Regelung („feedback control“) als auch als Steuerung („feedforward control“) übersetzt werden kann.

verfahrenstechnischer Prozesse entgegen kommt, sondern auch in der Lage ist, Nebenbedingungen für die Stell- und Regelgrößen explizit im Regelalgorithmus zu berücksichtigen (Dittmar und Pfeiffer, 2004).

In der Wasserwirtschaft ist der Einsatz von modellprädiktiven Steuerungen im Prinzip immer dann möglich, wenn ein mathematisches Prozessmodell zur Verfügung steht. Neben den in Kapitel 2.4.1 aufgeführten Arbeiten für die Steuerung von Entwässerungssystemen wurden die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens z.B. auch für die Bewirtschaftung von Bewässerungsanlagen (Park et al., 2009), zur Steuerung von Wasserkraftanlagen in Fließgewässern (Detering (2002), Setz et al. (2008)), von Talsperren (Puig et al., 2009) sowie von Kläranlagen (Reichl, 2006) untersucht.

Generell haben modellprädiktive Verfahren die folgenden drei Merkmale gemeinsam:

- Es wird das Prinzip des zurückweichenden bzw. rollenden Horizonts angewendet.
- Die Berechnung der Stellorgane basiert auf der Minimierung einer Optimierungsfunktion.
- Es wird ein Prozessmodell zur Prädiktion zukünftiger Prozesszustände verwendet.

Entsprechend dieser drei Merkmale sind aus modelltechnischer Sicht drei Softwaremodule erforderlich: Jeweils ein Modul zur Steuerung des Prozessablaufs, zur Prozessmodellierung und zur Optimierung.

Grundsätzliche Informationen zum Ablauf der modellprädiktiven Abflusssteuerung in urbanen Entwässerungssystemen geben Zunic und Seus (1993), Harremoes und Rauch (1999) und Pirsing et al. (2006). Im Folgenden werden die Prinzipien der Methode erläutert und spezielle Merkmale und Anforderungen beim Einsatz des Verfahrens zur Abflusssteuerung in Entwässerungssystemen analysiert.

3.1. Das Prinzip des rollenden Horizonts

Die modellprädiktive Steuerung basiert auf dem Prinzip des rollenden Horizonts, bei dem Steuerungsentscheidungen fortlaufend durch Lösen eines Optimierungsproblems innerhalb eines Zeitintervalls – dem Steuerungszeitschritt – ermittelt werden. Die Optimierung liefert eine Folge von zukünftigen optimalen Steuerungseinstellungen, von denen aber nur die Erste (für das unmittelbar folgende Zeitintervall) an das System gemeldet wird. Der Horizont schreitet um die Länge des Steuerungszeitschritts voran und der Optimierungsprozess beginnt nach der Aktualisierung der Anfangsbedingungen wieder von vorne.

Für die Koordination des gesamten Prozessablaufs ist ein Softwaremodul erforderlich. Diese Software verwaltet sämtliche Dateien und bereitet alle erforderlichen Datensätze auf. Um alle Einflüsse auf den modellprädiktiven Prozess berücksichtigen zu können, müssen drei verschiedene Zeithorizonte unterschieden werden (siehe Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3): der Evaluierungshorizont, der Vorhersagehorizont und der Kontrollhorizont.

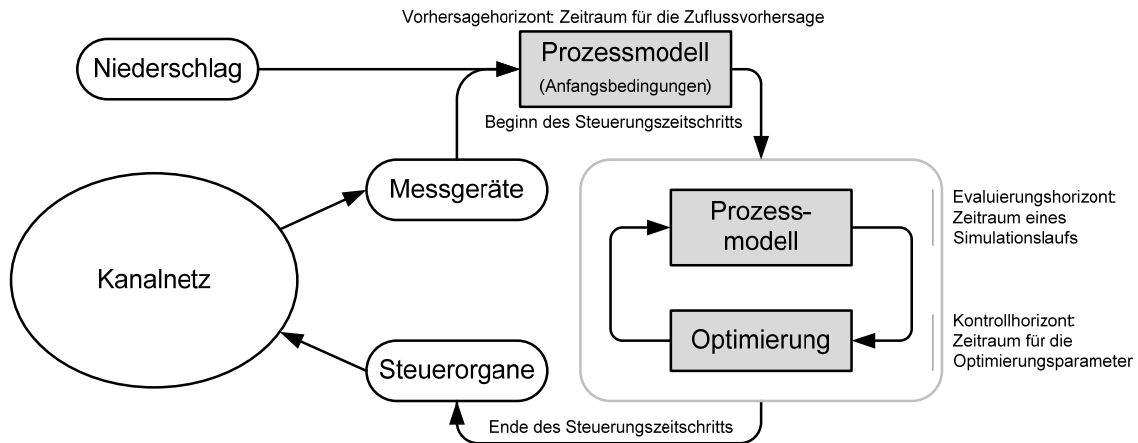


Abbildung 3.2: Ablauf und Teilprozesse bei der modellprädiktiven Steuerung

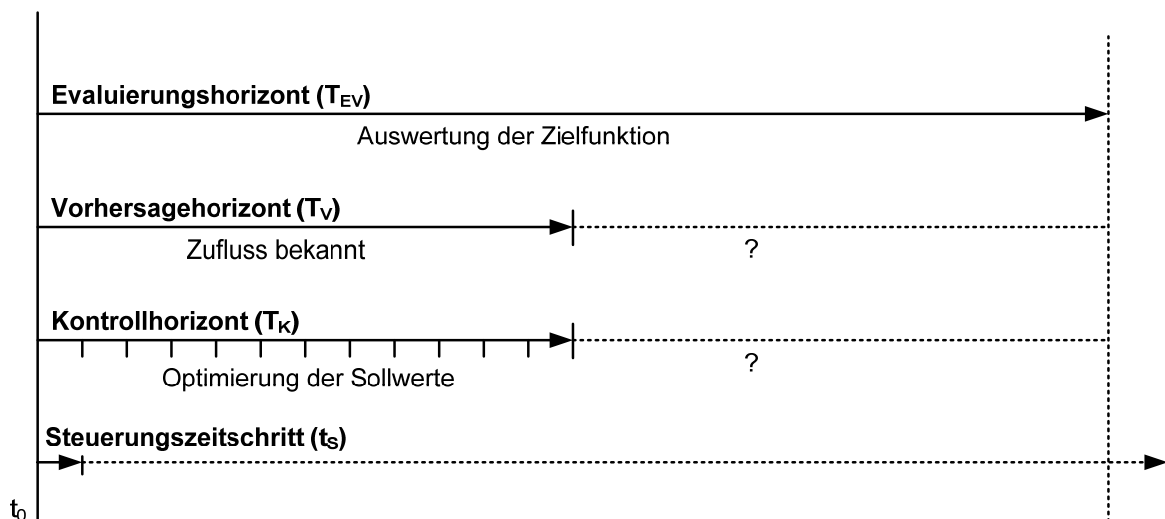


Abbildung 3.3: Zeithorizonte der modellprädiktiven Steuerung nach Rauch und Harremoes (1999, verändert)

Evaluierungshorizont. Der Evaluierungshorizont beschreibt das Zeitfenster, das für die Evaluierung der Zielfunktion erforderlich ist. Er entspricht damit dem Zeitraum eines Simulationslaufs des Prozessmodells. Der Evaluierungshorizont ist – neben den hydraulischen Eigenschaften des Entwässerungssystems – maßgeblich abhängig vom Steuerungsziel. Bei immissionsbasierten Steuerungen, bei denen Gewässergüteparameter als Steuerungsziel angesetzt werden, sind deutlich längere Evaluierungshorizonte als bei abflussbasierten Steuerungen erforderlich, um die biologischen Abbau- und Umwandlungsprozesse im Gewässer bewerten zu können.

Vorhersagehorizont. Der Vorhersagehorizont ist das Zeitfenster, für das Informationen über die Eingangsdaten (d.h. die Zuflussinformationen) zur Verfügung stehen. Der Vorhersage-

horizont ist somit abhängig von der Art und der Qualität der vorliegenden Niederschlagsprognose und der Berechnung der Zuflussganglinien zum Prozessmodell. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dieser gesamte Prozess mit Unsicherheiten behaftet ist. Das Ausmaß der Unsicherheiten wird wiederum maßgeblich von den Verfahren der Niederschlagsvorhersage und von den Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Einleitungswellen bestimmt.

Kontrollhorizont. Der Kontrollhorizont ist das Zeitfenster, für das die Steuerungsentscheidungen für sämtliche Steuerorgane ermittelt werden. Die Länge dieses Zeitschrittes ist stets ein Vielfaches des Steuerungszeitschrittes.

Steuerungszeitschritt. Der Steuerungszeitschritt ist das Zeitintervall, innerhalb dessen die Steuerungsentscheidungen gefunden werden müssen. Ein kleiner Zeitschritt führt zu einer zu hohen Belastung der Steuerorgane, bei einem zu großen Zeitschritt besteht aufgrund der Abflusssdynamik praktisch keine Möglichkeit mehr, sinnvoll in den Abflussprozess einzugreifen.

Ein Ablaufschema der modellprädiktiven Steuerung ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

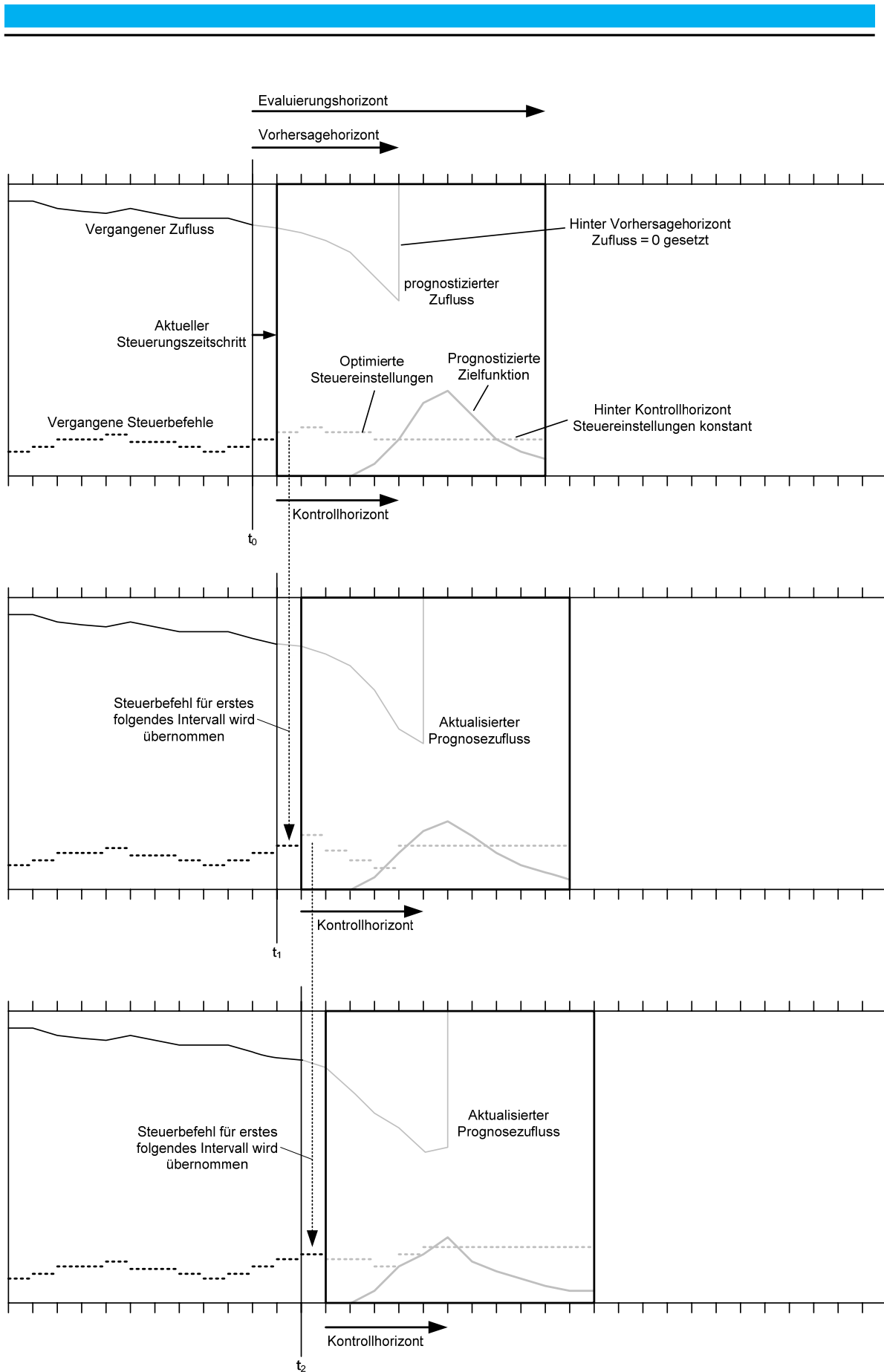


Abbildung 3.4: Ablauf bei der modellprädiktiven Steuerung

Die in dieser Arbeit verwendeten Begriffsdefinitionen basieren auf den Ausführungen von Rauch und Harremoes (1999). Generell gibt es diesbezüglich keine einheitlichen Begriffsdefinitionen. So wird in vielen Untersuchungen nicht zwischen dem Evaluierungs- und dem Kontrollhorizont unterschieden wird, sondern dass stattdessen ein (Optimierungs-)Horizont betrachtet. Eine detaillierte Unterscheidung der Zeithorizonte ist allerdings sinnvoll, wenn die Software verschiedene Steuerungsziele oder Veränderungen in der Niederschlags- oder Zuflussvorhersage berücksichtigen soll. Eine Differenzierung zwischen Evaluierungshorizont und Kontrollhorizont ist z.B. bei immissionsorientierten Steuerungen erforderlich, bei denen für die Auswertung der Zielfunktion im Prozessmodell ein ausreichend langer Simulationszeitraum (Evaluierungshorizont) angesetzt werden muss, ein ebenso langer Kontrollhorizont jedoch nicht erforderlich ist.

Explizite Untersuchungen zum Einfluss der verschiedenen Zeithorizonte wurden von Papageorgiou et al. (1987), Schilling (1990) sowie Rauch und Harremoes (1999) durchgeführt. Die maßgeblichen Ergebnisse sind im Folgenden zusammengestellt.

Papageorgiou et al. (1987) stellten fest, dass größere Steuerungszeitschritte als fünf Minuten aufgrund der Verminderung der zeitlichen Flexibilität zu deutlichen Verschlechterungen der Steuerungsergebnisse führen, kleinere Zeitschritte aber nur zu unwesentlichen Verbesserungen. Sie führen weiter aus, dass der Optimierungshorizont auf jeden Fall deutlich größer als der Steuerungszeitschritt sein muss, da sonst durch eine zu „kurzsichtige“ Vorgehensweise die unmittelbar folgenden Kontrollentscheidungen auf Kosten der nachfolgenden Entscheidungen optimiert werden.

Schilling (1990) ermittelte, dass Zuflussvorhersagen zwar sinnvoll für die Steuerung sind, dass der praktisch notwendige Vorhersagehorizont aber meist deutlich kürzer ist als die gesamte Dauer eines Abflussereignisses.

Zunic und Seus (1993) stellten in ihren Untersuchungen zur abflussbasierten Steuerung ebenfalls fest, dass ein zu weit in der Zukunft liegender Optimierungshorizont sinnlos ist, da weder der künftige Niederschlag noch der künftige Systemzustand genau genug bekannt sind. Je weiter man in die Zukunft schaut, umso vager werden die Aussagen des Prozessmodells. Greift der Optimierungshorizont dagegen zu kurz, so wird der Wirkungsbereich eines Stellorgans u.U. so weit eingeschränkt, dass die Erfüllung des Steuerungsziels gefährdet ist. Die Autoren schließen daraus, dass der Optimierungshorizont so weit in der Zukunft liegen muss, damit der Einflussbereich einer Steuerungsmaßnahme alle Sammler und Sonderbauwerke einer Kanalisation umfasst, für die der Steuerbefehl noch Wirkung zeigen soll. Eine weitere Ausdehnung des Optimierungshorizonts ist hinsichtlich der Entlastungen so gut wie wirkungslos, während die Unsicherheiten bei der Niederschlagsprognose überproportional zunehmen.

Gelormino und Ricker (1994) stellten am Beispiel des Kanalnetzes von Seattle fest, dass der Optimierungshorizont nur geringe Auswirkungen auf die Minimierung der Entlastungsabflüsse hat, schränken jedoch gleichzeitig ein, dass die erforderliche Länge des Optimierungshorizonts stark vom verwendeten Prozessmodell abhängt. In ihrem Fall basierte das Prozessmodell auf einem System von Linearspeichern ohne Totzeiten, womit sie die geringen Auswirkungen des Optimierungshorizonts erklären. Sie stellten weiterhin fest, dass die Auswirkungen von schlechten Niederschlagsvorhersagen nur gering sind und

vermuteten, dass eine Verbesserung der Vorhersagequalität die Entlastungsmengen nicht weiter vermindern würde. Sie schließen aus ihrer Arbeit, dass der Vorteil von modellprädiktiven Steuerungen vor allem dann zum Tragen kommt, wenn die Niederschläge heterogen fallen.

Rauch und Harremoes (1999) führten eine Sensitivitätsanalyse durch, in der die Auswirkungen verschieden langer Zeithorizonte sowie unterschiedlicher Steuerungszeitschritte untersucht wurden. Hierbei stellten sie fest, dass die Länge des Vorhersagehorizonts am sensitivsten ist. Korrekte Niederschlagsvorhersagen über einen langen Zeitraum führen hinsichtlich der formulierten Steuerungsziele zu deutlich besseren Ergebnissen.

Meßmer und Papageorgiou (2009) führten aus, dass auch mit aufwändigeren Niederschlag-Abfluss-Modellen keine zuverlässige Zuflussvorhersage von mehr als 15 Minuten aus momentanen Regenmesswerten erreichbar ist. Das Verbesserungspotential bei größeren Vorhersagehorizonten nimmt nur noch geringfügig zunimmt.

Die Länge der Zeithorizonte sowie des Steuerungszeitschrittes hängt zunächst einmal von den jeweiligen Eigenschaften des Entwässerungssystems ab. Aus den vorliegenden Ergebnissen lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Der Evaluierungshorizont definiert im Rahmen der Simulationen das längste Zeitfenster. Er muss ausreichend lang sein, um die definierten Steuerungsziele erfassen zu können; er sollte aber auch nicht länger sein als erforderlich, da sonst die Rechenzeiten ansteigen.
- Theoretisch stellt sich der maximale Nutzen ein, wenn der Kontrollhorizont genauso lang ist wie der Evaluierungshorizont. Der Nutzen steigt allerdings mit länger werdendem Kontrollhorizont nur noch geringfügig an. Ein langer Kontrollhorizont führt darüber hinaus zu einer großen Anzahl an Optimierungsvariablen, so dass der Kontrollhorizont in der Praxis kleiner gewählt werden sollte als der Evaluierungshorizont.
- Die Länge des Vorhersagehorizonts ist unabhängig vom Evaluierungs- und Kontrollhorizont und wird durch die zur Verfügung stehenden Messwerte und Niederschlag-Abfluss-Modellierungen bestimmt.

3.2. Anforderungen an die Optimierung

Wird das Problem der Steuerung eines dynamischen Systems als mathematische Optimierungsaufgabe formuliert, muss die Zielfunktion um die zusätzliche Dimension der Zeit ergänzt werden (Schilling, 1987). Die Zielfunktion ist dann eine Kostenfunktionen der Zustände x_t und der Eingangsgrößen u_t .

$$\min \left[\sum_{t=1}^n f(x_t, u_t) \right] \quad \text{Gl. 3.1}$$

mit:

$f(x_t, u_t)$	Zielfunktion
x_t	Zustandsvariablen
u_t	Eingangsgrößen

Die Nebenbedingungen bilden die physikalischen Zwänge des Systems ab. Sie lassen sich unterteilen in

- die Anfangsbedingungen $x_1 = c$
- die Zustandseinschränkungen $h(x_t) \leq 0$ mit $t = 1, 2, \dots, n$
- die Steuerungseinschränkungen $k(x_t, u_t) \leq 0$ mit $t = 1, 2, \dots, n$
- die Endbedingungen $p(x_{n+1}) = 0$
- die Nichtnegativitätsbedingungen $x_t \geq 0$ bzw. $u_t \geq 0$ mit $t = 1, 2, \dots, n$
- die Systemdynamik $x_{t+1} = g(x_t, u_t)$ mit $t = 1, 2, \dots, n$

Mit Ausnahme der Systemdynamik handelt es sich bei den ersten fünf Bedingungen um statische Randbedingungen.

Für die modellprädiktive Steuerung eignen sich alle Optimierungsmethoden, die zur Parameteroptimierung eingesetzt werden können. Der Einsatz von hydrodynamischen Modellen für die Prozessmodellierung schließt die Verwendung der linearen und der quadratischen Programmierung aus, da beide Verfahren ausschließlich lineare Nebenbedingungen zulassen. Gemäß der Klassifizierungen in Kapitel 2.3.4 verbleiben indirekte (ableitungsbasierte) und direkte („Black-Box“) Methoden.

Multikriterielle Verfahren können für modellprädiktive Steuerungen nicht eingesetzt werden, da das Prinzip des rollenden Horizonts eine automatisierte Steuerungsentscheidung erfordert. Sollen trotzdem unterschiedliche Zielkriterien berücksichtigt werden, müssen diese über einen a-priori-Wichtungsansatz auf ein monokriterielles Problem reduziert werden.

Bei nicht-linearen Optimierungsproblemen werden möglichst immer global optimale Lösungen gesucht. Dass mit globalen Suchverfahren tatsächlich bessere Steuerungsentscheidungen als mit lokalen Verfahren gefunden werden können, konnte bisher jedoch nicht nachgewiesen werden. Wie bereits ausgeführt, soll diese Frage im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Globale Suchmethoden können ausschließlich mit direkten Optimierungsverfahren eingesetzt werden. Somit ist eine Software zur modellprädiktiven Steuerung mit direkten Optimierungsverfahren erforderlich.

3.3. Anforderungen an die Prozessmodellierung

Das Prozessmodell hat die Aufgabe, die zukünftigen Zustände des betrachteten Systems zu berechnen, um daraus die Steuerungsziele zu quantifizieren. Es muss in der Lage sein, das Systemverhalten für die ausgewählte Steuerungsstrategie im Detail zu simulieren und spezielle hydraulische Effekte darzustellen (DWA, 2005). Im Rahmen der modellprädiktiven Steuerung dient das Prozessmodell zur Auswertung der Zielfunktion und repräsentiert gleichzeitig die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems.

Nach DWA (2005) müssen Prozessmodelle bei der Planung von Abflusssteuerungen die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Berechnung von Steuerungseingriffen bzw. der Veränderung von Sollwerten
- Erfassung der zeitlichen Zusammenhänge zwischen Steuerungseingriff und zugehöriger Auswirkung auf das Fließverhalten
- Berechnung der spezifizierten Bewertungskriterien als Maß für den Steuerungserfolg (z. B. Überlaufhäufigkeiten, -volumina, Gewässerbelastung)
- Flexibilität der Software hinsichtlich der Spezifikation von Steuerungsalgorithmen
- Eignung des Simulationsmodells für Langzeitsimulationen
- Eignung des Simulationsmodells zur hydrodynamischen Simulation, insbesondere der Berücksichtigung von hydrodynamischen Effekten bei Steuerungseingriffen (z. B. Rückstau, Druckrohrleitungen, Steuerorgane)
- Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells
- Akzeptanz der verwendeten Software seitens der zuständigen Genehmigungsbehörde

Für die modellprädiktive Steuerung lässt sich die Liste um folgenden Punkt ergänzen:

- Vollständige Erfassung des Entwässerungssystems. Eine hintereinander erfolgende Abarbeitung einzelner Netzteile ist nicht zielführend.

Um die in Gl. 3.1 eingeführte Dimension der Zeit berücksichtigen zu können, müssen die Prozessmodelle vor allem die folgenden beiden speziellen Eigenschaften besitzen:

- Speicherung von Systemzuständen (Wasserstände in Schächten und Abflüsse in Haltungen) und deren Nutzung als Anfangsbedingung für spätere Simulationsläufe
- Modellierung zeitabhängiger Steuerungen. Dies betrifft alle Drosselorgane, Schieber und Wehre, die für die Abflusssteuerung als Steuerorgan verwendet werden und damit gleichzeitig einen Optimierungsparameter darstellen.

Da das Ziel dieser Arbeit die Verwendung von hydrodynamischen Berechnungsansätzen für die Prozessmodellierung ist, sei an dieser Stelle ebenfalls noch die Stabilität der numerischen Lösungsverfahren genannt. Diese Anforderung stellt sich zwar generell für alle hydrodynamischen Kanalnetzrechnungen. Sie gilt bei Steuerungsaufgaben aber

umso mehr, da durch numerische Instabilitäten hervorgerufene Abflussspitzen zu chaotischen Steuerungsentscheidungen führen können.

3.4. Herausforderungen bei der modellprädiktiven Steuerung

Für den Erfolg einer modellprädiktiven Steuerung sind vor allem zwei Aspekte entscheidend: die Güte bzw. Qualität der ermittelten Steuerentscheidungen und die Rechenzeit. Beide sollen nachfolgend betrachtet werden.

3.4.1. Steuerungsgüte

Als Referenz für den Nutzen einer Abflusssteuerung dient das ungesteuerte System. Der Erfolg einer Steuerung wird über die Verbesserung der formulierten Steuerungsziele gegenüber dem ungesteuerten System definiert.

Ungesteuerte Entwässerungssysteme sind so ausgelegt, dass der Bemessungsabfluss schadfrei abgeleitet werden kann. In Verbindung mit dem Nicht-Verschlechterungs-Verbot gegenüber dem ungesteuerten System ist insbesondere darauf zu achten, dass suboptimale Optimierungsergebnisse nicht zu folgenschweren Steuerungsentscheidungen führen. Ursache hierfür können Ausfälle bzw. Fehlermeldungen von Messgeräten sein. So könnte z.B. eine fehlerhafte Steuerung eines Drosselabflusses eine Überflutung an einem oberhalb liegenden Kanalabschnitt bewirken.

3.4.2. Rechenzeit

Bei modellprädiktiven Systemen müssen innerhalb des Steuerungszeitschrittes die aktuellen Messwerte aus Kanal und Einzugsgebiet erfasst werden, dem Prozessmodell die zugehörigen Anfangsbedingungen bereit gestellt und schließlich die kompletten Optimierungsrechnungen durchgeführt werden. Am Ende des Steuerungszeitschrittes sind die optimalen Steuerungsentscheidungen zu ermitteln und diese an die Steuerorgane des Kanalnetzes weiterzuleiten. Die insgesamt benötigte Rechenzeit muss kleiner als der Steuerungszeitschritt sein.

Wie in Kapitel 2.3.4 ausgeführt, handelt es sich bei der Optimierung im Rahmen der modellprädiktiven Steuerung um eine simulationsbasierte Parameteroptimierung, bei der die Zielfunktion durch das Simulations- bzw. Prozessmodell ausgewertet wird. Strukturell bedingt bestehen zwei Möglichkeiten, die Rechenzeit des Optimierungsprozesses zu verringern: Beschleunigung der Konvergenz des Optimierungsverfahrens und Verringerung der Rechenzeiten des Simulationsmodells.

Beschleunigung der Optimierung

Im Gegensatz zu immissionsorientierten Steuerungen, bei denen nur indirekte Optimierungsverfahren eingesetzt werden können, besteht bei abflussbasierten Steuerungen die Möglichkeit, sowohl direkte als auch indirekte Optimierungsverfahren zu verwenden.

Bei der direkten Optimierung wird das bestehende Simulationsmodell unverändert für die Steuerung eingesetzt. Da auf die Prozessgleichungen nicht zugegriffen wird, um deren Ableitungen analytisch zu berechnen, sind die möglichen Optimierungsmethoden mit einem großen Rechenaufwand verbunden: Die globalen Methoden suchen den gesamten Parameterraum ab, die lokalen Methoden berechnen die Suchrichtung numerisch durch wiederholte Auswertung der Zielfunktion. Beide Vorgehensweisen erfordern viele Zielfunktionsauswertungen. Das Optimierungsmodul ermittelt die vermeintlich besten Modelldatensätze, die daraufhin vom Simulationsmodell evaluiert werden. Liefert ein Modelldatensatz ein schlechteres Ergebnis als ein bereits vorliegender Datensatz, kommt er letztlich als „optimales Ergebnis“ nicht in Betracht. Handelt es sich um ein Problem mit vielen Optimierungsparametern, ist – unabhängig vom Optimierungsalgorithmus – immer eine große Anzahl an Optimierungsschritten erforderlich.

Eine Möglichkeit zur Beschleunigung der globalen Suchverfahren ist die Parallelisierung der Berechnungen. Dies ist bei populationsbasierten Optimierungsverfahren, wie z.B. den evolutionären Algorithmen, möglich. Entsprechende Ansätze sind in dem verwendeten Optimierungsmodul BlueM.Opt implementiert. Kerber (2009) entwickelte ein hybrides Optimierungsverfahren für multikriterielle Probleme, das die Verwendung mehrerer Rechner in einem Netzwerk ermöglicht. Hübner (2010) erstellte eine sogenannte „multi-threading Funktion“ für die in BlueM.Opt implementierten Evolutionsstrategien, mit denen die Rechenlast auf mehrere Prozessoren eines Computers verteilt werden kann. Da multikriterielle Zielfunktionen für die modellprädiktive Steuerung nicht anwendbar sind und die Fallbeispiele auf Computern mit Einkernprozessoren gerechnet wurden, konnten diese Möglichkeiten in dieser Arbeit nicht genutzt werden.

Indirekte Optimierungsmethoden konvergieren grundsätzlich schneller als direkte Methoden. Die Suchrichtung wird durch Berechnung der Differentialquotienten der Prozessgleichungen ermittelt und steht somit mit wenigen Rechenschritten zur Verfügung. Werden die Prozessgleichungen und deren Ableitungen komplizierter, steigt der Rechenaufwand deutlich an. Ansätze für die modellprädiktive Kanalnetzsteuerung mit indirekter Optimierung und hydrodynamischen Modellen existierten bislang nicht. Ein entsprechendes Verfahren wurde erstmals im Rahmen des Forschungsprojektes „Odysseus“ entwickelt (siehe Kapitel 1.3). Mit dieser Software ermittelte Ergebnisse standen in dieser Arbeit für ein Fallbeispiel zur Verfügung, so dass die Möglichkeiten der Rechenzeitreduzierung durch die indirekte Optimierung abgeschätzt werden können.

Beschleunigung der Prozessmodellierung

Wie die Zusammenstellung in Kapitel 2.4 zeigt, wurden hydrodynamische Berechnungsansätze für die Prozessmodellierung in der Praxis bislang noch nicht verwendet. Eingesetzt werden stattdessen vereinfachte Prozessmodelle, deren Erstellung allerdings aufwändig ist.

Durch die zahlreichen Anwendungen von Optimierungs- und Steuerungsmethoden in der Entwässerungsplanung wurde die Erstellung und Anwendung dieser vereinfachten Modelle in jüngerer Zeit auch in der Forschung immer wieder thematisiert. Veröffentlichungen, die sich mit dem Thema beschäftigen, sind z.B. Einfalt und Simon (2001), Meirlaen et al. (2002), Cembrano et al. (2004), Vanrolleghem et al. (2005) oder Schindler et al. (2007). Demnach können Modelle auf zwei Arten vereinfacht werden: Erstens durch Verwendung von einfacheren und schnelleren Berechnungsansätzen und zweitens durch Reduzierung der Daten des Entwässerungssystems in räumlicher und zeitlicher Hinsicht.

Die Möglichkeiten zur Verwendung einfacherer Berechnungsansätze orientieren sich an den in Kapitel 2.3 aufgeführten Methoden und wurden bereits dargestellt. Bei der Reduzierung der Modelldaten bietet sich an, das Abflusssystem vorab auf die für die Steuerung relevanten Teile zu beschränken: Teilnetze, die von der Steuerung nicht betroffen sind, brauchen bei der eigentlichen Optimierung nicht berücksichtigt werden. Sie müssen lediglich einmal vor Beginn der Optimierung zur Ermittlung der Anfangsbedingungen berechnet werden. Im Einflussbereich der Steuerung kann dann das Kanalnetz vereinfacht abgebildet werden, d.h. mehrere Knoten, Haltungen und Einzugsgebiete werden zusammengefasst, um die Anzahl der Elemente zu verringern.

Da in dieser Arbeit die Verwendung von hydrodynamischen Modellen im Mittelpunkt steht, ist die Vereinfachung der Prozessgleichungen keine Option. Von den oben genannten beiden Möglichkeiten zur Vereinfachung verbleibt somit nur die Datenreduktion. Von dieser Möglichkeit wird auch Gebrauch gemacht, wie die Anwendungsbeispiele in Kapitel 5 zeigen.

Eine weitere Möglichkeit der Rechenzeitreduzierung besteht in der Verwendung schnellerer numerischer Lösungsverfahren. Da durch den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik der Uni Erlangen-Nürnberg ein eigenes Prozessmodell entwickelt wurde, konnten in dieser Arbeit zwei unterschiedliche Berechnungsansätze miteinander verglichen werden.

Die Rechenzeiten der Prozessmodelle können auch durch die Verwendung von Parallelisierungsansätzen verringert werden. Dass dies auch mit hydrodynamischen Berechnungsansätzen möglich ist, wurde z.B. durch Tandler (1994) nachgewiesen. In den entwickelten Programmen dieser Arbeit werden allerdings bislang keine Parallelisierungsoptionen eingesetzt.

4. Implementierung des modellprädiktiven Steuerungssystems

Zur Untersuchung der in Kapitel 2.5 formulierten Fragen wurde eine Software für die modellprädiktive Steuerung mit hydrodynamischen Berechnungsverfahren entwickelt. Mit dieser Software können sowohl abflussbasierte als auch schmutzfrachtbasierte Steuerungsziele untersucht werden. Zur Berechnung der Steuerungsentscheidungen werden direkte Optimierungsverfahren eingesetzt. Somit können lokale und globale Optimierungsalgorithmen verwendet werden.

Wie bereits in Kapitel 1.2 erläutert, werden die in dieser Arbeit entwickelten Methoden und Werkzeuge ausschließlich an Hand von Simulationsstudien überprüft. Es wird davon ausgegangen, dass das Simulationsmodell Abfluss und Stofftransport korrekt abbildet. Zur fortlaufenden Berechnung der Anfangsbedingungen in jedem Steuerungszeitschritt kann daher auf eine Anpassung der Modellparameter verzichtet werden. In der Praxis ist diese Anpassung jedoch erforderlich, da sich die simulierten Zustandsgrößen von den Messwerten im Entwässerungssystem unterscheiden werden.

4.1. Aufbau der Software

Die modellprädiktive Steuerungssoftware BlueM.MPC⁵ orientiert sich an der in Kapitel 3 dargestellten Methodik und verwendet für die Optimierung das Modul BlueM.Opt und für die Prozessmodellierung das Modul SWMM5. BlueM.MPC besitzt hierbei eine übergeordnete Funktion (siehe Abbildung 4.1). Die Module für Optimierung und Prozessmodellierung können auch ohne die Einbindung in BlueM.MPC als ausführbare Programme (*.exe) betrieben werden. Im Rahmen der Arbeit wurden Schnittstellen programmiert⁶, damit beide Module als Bibliothek (*.dll) in BlueM.MPC eingebunden werden konnten. Die Software läuft unter Windows und erfordert lediglich das .NET Framework 2.0, das von der Firma Microsoft kostenfrei zur Verfügung gestellt wird.

Gemäß den Definitionen in Kapitel 2.3.4 basiert die Berechnung der Steuerungsentscheidungen auf einem direkten Optimierungsprozess. Als Black-Box für die Zielfunktionsauswertung wird SWMM5 verwendet. Die Softwaremodule kommunizieren untereinander über Textdateien. Die Prozesssteuerung stellt die Anfangsbedingungen für das Prozessmodell zur Verfügung, das Optimierungsmodul generiert die Eingabedaten für das Prozessmodell und das Prozessmodell selbst generiert die Ergebnisdaten, die wiederum vom Optimierungsmodul ausgewertet werden. Die Verwendung von Textdateien für Ein- und Ausgabeinformationen ist hinsichtlich der Rechenzeit nicht optimal. Bei Simulationsmodellen für die Entwässerungsplanung sind Textdateien jedoch üblich und besitzen den Vorteil, dass sämtliche Prozessinformationen während der gesamten Simulation vorgehalten und alle Prozesse und Entscheidungen nachvollzogen werden können.

⁵ Weitergehende Informationen zum Programmpaket BlueM sowie eine detaillierte Dokumentation zu BlueM.MPC finden sich im Internet unter www.bluemodel.org.

⁶ Betrifft vor allem BlueM.Opt. SWMM5 hat bereits die erforderlichen Schnittstellen implementiert und kann durch wenige Modifikationen des Quellcodes als dll kompiliert werden.

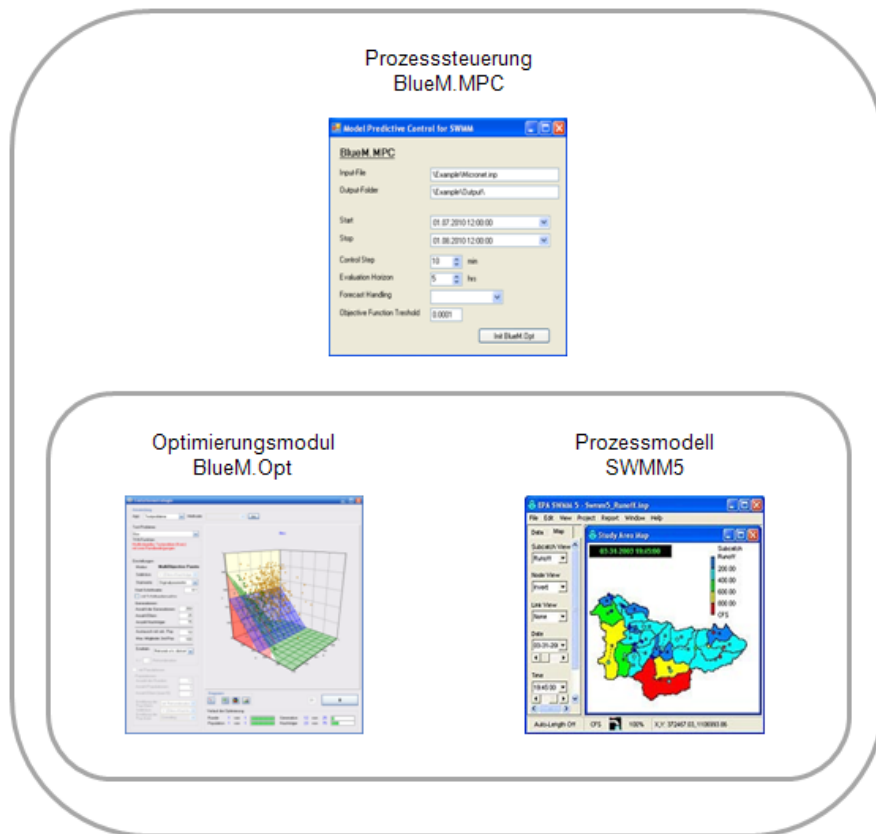


Abbildung 4.1: Aufbau der Software BlueM.MPC

4.1.1. Prozesssteuerung mit BlueM.MPC

Das übergeordnete Modul BlueM.MPC steuert den Prozess des rollenden Horizonts sowie den gesamten Datenfluss. Die Anwendung der Software ist einfach, da sie – ebenso wie BlueM.Opt – lediglich aus einer Eingabemaske mit vorformatierten Eingabefeldern besteht (siehe Abbildung 4.2). Neben beiden Eingabemasken sind lediglich drei Dateien für die Anwendung erforderlich⁶:

- Eine Eingabedatei für das Simulationsmodell SWMM5 zur Beschreibung des Prozessmodells.
- Eine Eingabedatei für das Optimierungsmodul BlueM.Opt mit Informationen zu Optimierungsparametern und Zielfunktionen.
- Eine Eingabedatei für BlueM.MPC mit Informationen zur Niederschlags- bzw. Zuflussvorhersage.

Jedem Knoten des hydraulischen Modells kann dabei ein Vorhersagehorizont zugewiesen werden. Darüber hinaus können Unsicherheiten in der Zuflussvorhersage über zeitabhängige Funktionen simuliert werden.

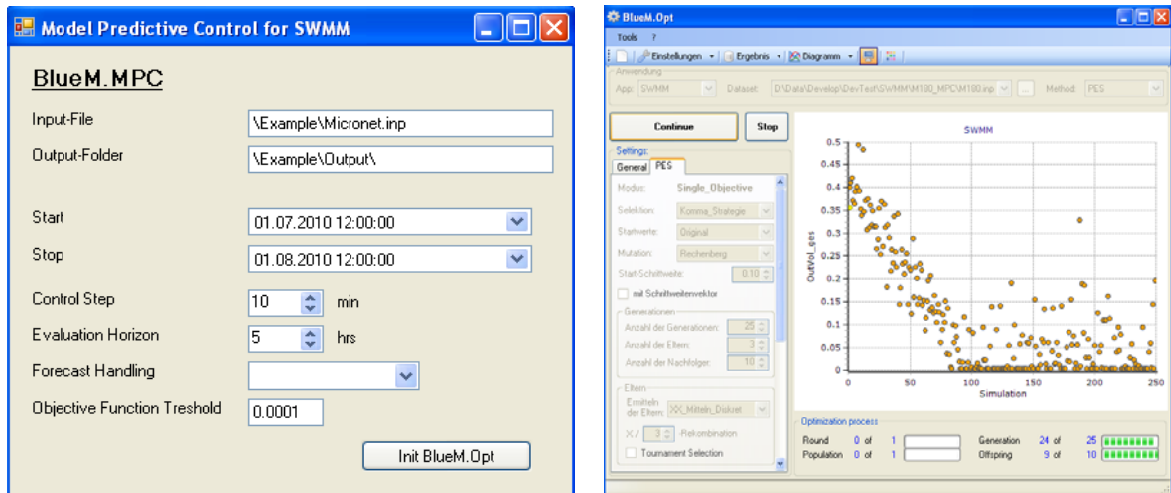


Abbildung 4.2: Eingabemasken für BlueM.MPC (links) und BlueM.Opt (rechts)

Einen schematischen Überblick über den Prozessablauf und den Einsatz der einzelnen Module gibt Abbildung 4.3.

Mit Beginn des Steuerungszeitschritts werden zunächst die Anfangsbedingungen aufbereitet und in die entsprechenden Dateien geschrieben. Hierbei handelt es sich um

1. Zuflüsse zum Kanalnetz aus Niederschlag-Abfluss-Simulationen,
2. Wasserstände und Abflüsse im Kanalnetz des vorangegangenen Steuerungszeitschritts sowie
3. Einstellungen der Steuerungsorgane des vorherigen Kontrollhorizonts.

Sind die Anfangsbedingungen gesetzt, wird die Optimierung angestoßen. Optimiert werden die Steuerungsentscheidungen aller Steuerungsorgane für den Kontrollhorizont. Während des iterativen Vorgangs wird die Optimierungsschleife bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums durchlaufen. In der Optimierungsschleife erstellt BlueM.Opt die Eingabedatei für SWMM5 (Beispiel.inp). Nach der Simulation dieses Datensatzes werden die Ergebnisse (Beispiel.rpt) von BlueM.Opt eingelesen, die Zielfunktion ausgewertet und ein neuer Datensatz generiert. Nach Erreichen des Abbruchkriteriums wird die so gefundene beste Lösung in Form eines Datensatzes an BlueM.MPC übergeben.

Anstatt die ermittelten Steuerungsentscheidungen an das Kanalnetz zu melden, wird der aktuelle Zeitschritt noch einmal in BlueM.MPC zur Gewinnung der Anfangsbedingungen für den nächsten Steuerungszeitschritt simuliert. Der rollende Horizont wandert um einen Steuerungszeitschritt weiter und der Prozess beginnt von vorne.

Die optimalen Lösungen für jeden Steuerungszeitschritt werden in eine Logdatei geschrieben. Nach Ende der gesamten Berechnung kann eine abschließende Berechnung mit den optimalen Lösungen für jeden Steuerungszeitschritt durchgeführt werden.

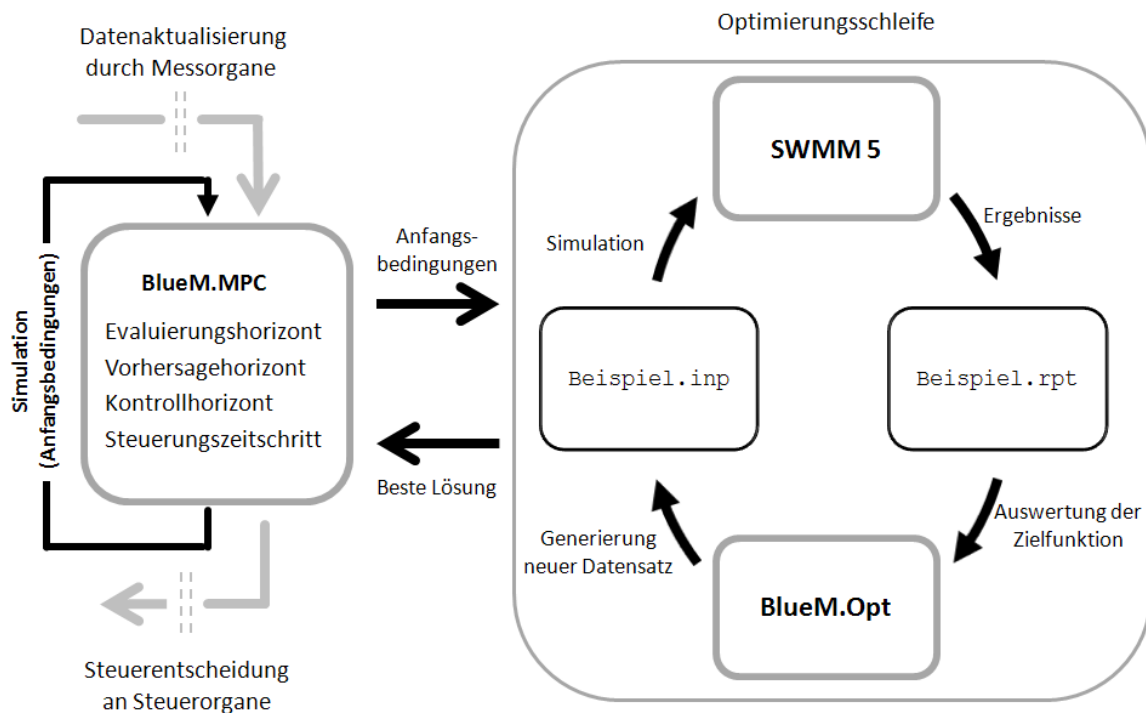


Abbildung 4.3: Komponenten und Ablaufschema der Software BlueM.MPC

4.1.2. Optimierung mit BlueM.Opt

BlueM.Opt ist eine Optimierungssoftware, die am Fachgebiet für Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung der TU Darmstadt entwickelt wird. Aufbauend auf der Erkenntnis, dass (1) kein Prozessmodell bzw. Simulator alle Anwendungen abdecken kann und (2) kein einzelnes Optimierungsverfahren für alle Probleme geeignet ist, wurde BlueM.Opt als generisches Werkzeug für die Parameteroptimierung konzipiert (Muschalla et al. (2009)). BlueM.Opt integriert verschiedene (lokale und globale) Optimierungsverfahren und unterstützt textbasierte Simulationsmodelle (siehe Abbildung 4.4).

Da im Rahmen dieser Arbeit die Leistungsfähigkeit von lokalen und globalen Optimierungsmethoden untersucht werden soll, kommen in den Fallbeispielen, die in Kapitel 5 dokumentiert sind, zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz:

- Das Verfahren von Hooke & Jeeves, ein lokales, ableitungsfreies Suchverfahren sowie
- parametrische Evolutionsstrategien (PES), ein globales, stochastisches Suchverfahren.

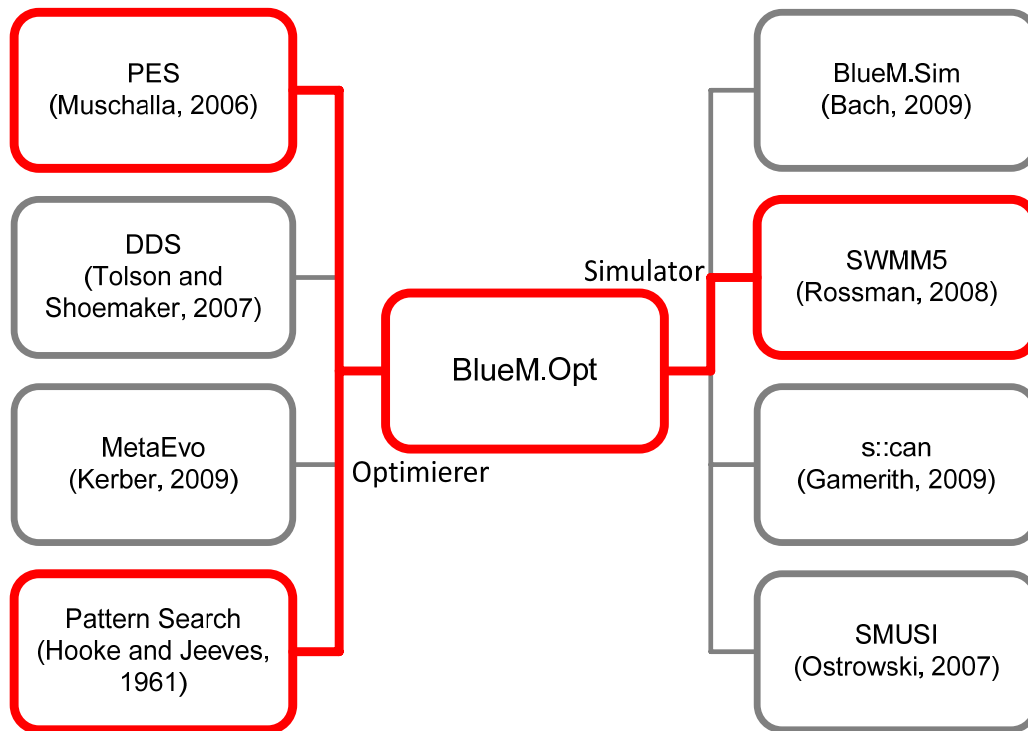


Abbildung 4.4: BlueM.Opt - Optimierungsverfahren und Simulatoren

Verfahren von Hooke & Jeeves

Der Algorithmus von Hooke und Jeeves (1961) ist eine lokale deterministische Optimierungsmethode, die auch als „pattern search“⁷ bezeichnet wird. Das Verfahren vollzieht gewissermaßen das experimentelle Ausprobieren („Trial and Error“) des Menschen nach (Adamy, 2007). Es ist ein Abstiegsverfahren, das geeignet für Probleme ist, in denen man den Gradienten einer Zielfunktion nicht berechnen kann. Das Verfahren zeichnet sich durch seine guten Konvergenzeigenschaften aus.

Für die Anwendung ist lediglich eine Anfangsschrittweite erforderlich. Der Algorithmus führt wiederholt zwei Arbeitsphasen aus: Eine Tastschrittphase und einen Extrapolationsschritt. In der Tastschrittphase wird zunächst in einer Schleife über alle Optimierungsparameter eine Abstiegsrichtung ermittelt. Hierfür wird zunächst jeder Optimierungsparameter um die Schrittweite vergrößert. Ist der Zielfunktionswert für den neuen Parametersatz besser als der des Ausgangspunkts, wird der neue Parameter übernommen. Ist er schlechter, wird der Tastschritt in die umgekehrte Richtung ausgeführt. Ist die Schleife über alle Optimierungsparameter durchgelaufen, ergibt sich aus der Überlagerung aller erfolgreichen Tastschrittrichtungen die Abstiegsrichtung. Diese wird verwendet, um im Extrapolationsschritt den neuen Ausgangspunkt für die nächste Iteration zu ermitteln. Wird während der Tastschrittschleife keine Verbesserung des Zielfunktionswertes gefunden, wird die Schrittweite verkleinert. Der Algorithmus bricht die Optimierung ab, wenn eine vorab definierte minimale Schrittweite erreicht wird. Die Anzahl der

⁷ Der englische Begriff „Pattern search“ lässt sich als „Mustersuche“ übersetzen.

Zielfunktionsauswertungen ist daher vorab nicht bekannt. Ein Fließschema des Algorithmus ist in Abbildung 4.5 gegeben.

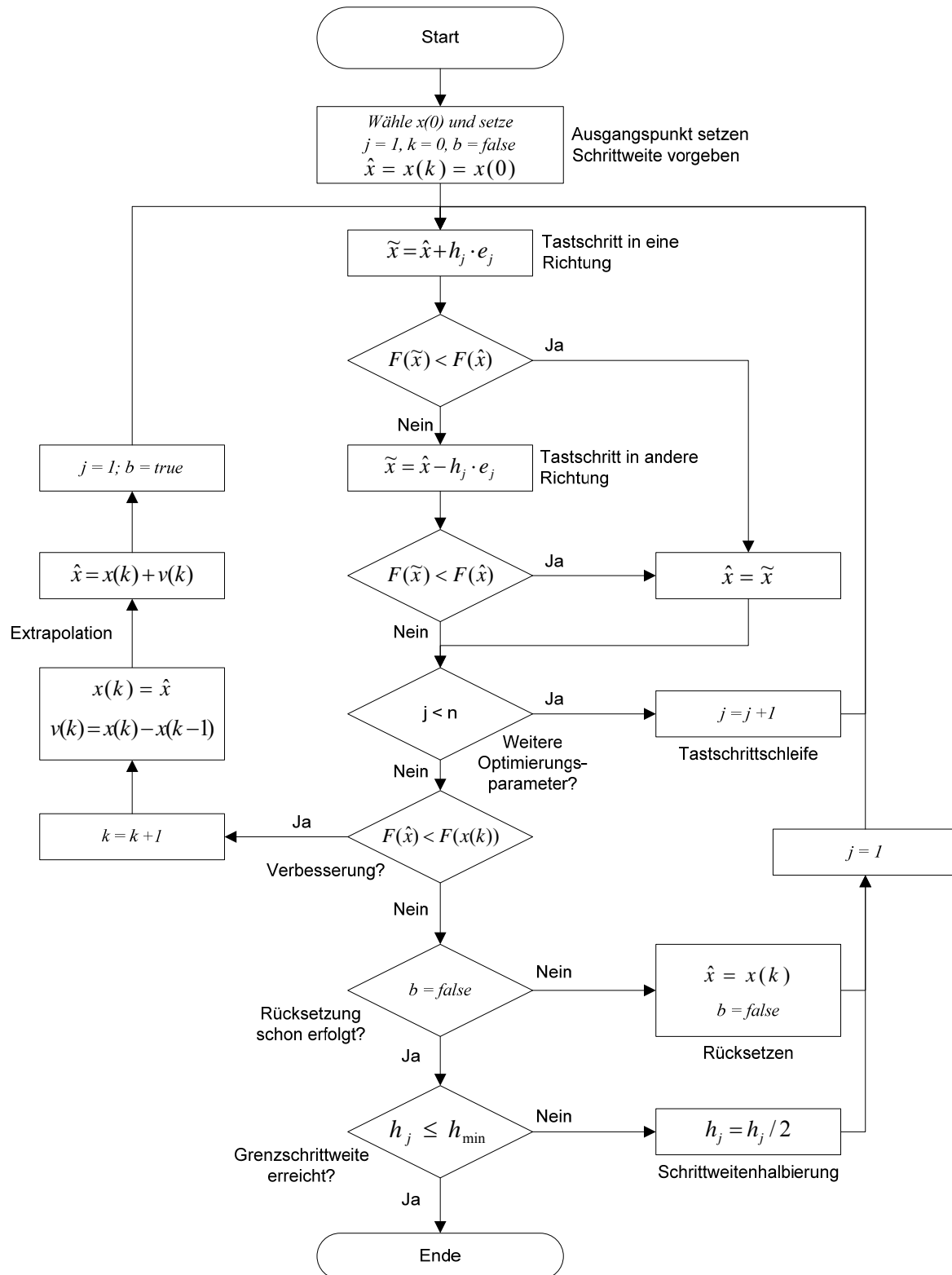


Abbildung 4.5: Fließschema des Algorithmus von Hooke & Jeeves (1961)

Evolutionsstrategien

Evolutionsstrategien imitieren die evolutionären Prinzipien zur Suche der optimalen Lösung. Sie gehören zu den globalen Optimierungsmethoden, die besonders für die komplexe Parameteroptimierung geeignet sind. Sie erfordern keine Ableitungsinformationen und erlauben die Berücksichtigung von linearen und nicht-linearen Nebenbedingungen. In BlueM.Opt wird die Methode PES (Parametrische Evolutionsstrategien) genannt. Sie wurde vorwiegend für multikriterielle Optimierungsprobleme entwickelt, lässt sich aber auch ohne weiteres für monokriterielle Fragestellungen einsetzen. PES basiert im Wesentlichen auf den von Rechenberg (1994) und Schwefel (1995) entwickelten Varianten der Evolutionsstrategien (Muschalla, 2006).

Evolutionsstrategien basieren auf den drei Elementen Rekombination, Mutation und Selektion. Das Grundprinzip ist folgendes: Ausgehend von μ Eltern werden durch Rekombination und Mutation λ Nachkommen erzeugt und evaluiert. Aus diesen Nachkommen werden wieder μ Individuen als Eltern für die nächste Generation selektiert. Dies wird solange wiederholt, bis sich das Individuum mit dem besten Zielfunktionswert von dem mit dem schlechtesten nur noch um einen vorgegebenen Wert unterscheidet oder bis eine vorgegebene Anzahl an Generationen erreicht ist. Ein Fließschema des Algorithmus ist in Abbildung 4.6 gegeben.

Populationsbasierte Optimierungsalgorithmen sind zur Verteilung der Rechenlast auf mehrere Prozessoren oder Computer geeignet. Eine manuelle Parallelisierung, die das parallele Ausführen zweier oder mehr Simulationen auf einem Mehrkernprozessor ermöglicht, wurde durch Hübner (2010) auch für die Evolutionsstrategien in BlueM.Opt implementiert.


Das Potenzial des maximalen möglichen Geschwindigkeitsgewinns durch die Parallelisierung kann mit Hilfe des Amdahlschen Gesetzes (Amdahl (1967), zitiert in Hübner (2010)) abgeschätzt werden. Das Gesetz besagt, dass die Beschleunigung von Programmen durch parallele Ausführung hauptsächlich durch den sequenziellen Anteil einer Problemstellung beschränkt ist. Der maximal mögliche Geschwindigkeitsgewinn S ist demnach abhängig von der Anzahl der Prozessoren p und berechnet sich auf Basis der sequentiellen, nicht parallelisierbaren Anteile f und den parallelisierbaren Anteilen $(1 - f)$:

$$S = \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{p}} \quad \text{Gl. 4.1}$$

mit:

S	Geschwindigkeitsgewinn
p	Anzahl der Prozessoren
f	Parallelisierbarer Anteil des Quellcodes

Der sequenzielle Anteil besteht bei der hier betrachteten Black-Box-Optimierung im Wesentlichen aus der Initialisierung des Gesamtsystems und aus dem Generieren und Verarbeiten einer gesamten Elterngeneration. Gerade bei monokriteriellen Problemstellun-



gen laufen diese Prozesse sehr schnell ab, da das beste Evaluierungsergebnis eindeutig identifizierbar ist. Der parallelisierbare Teil, die Simulation des Datensatzes, benötigt wesentlich mehr Rechenzeit. Hübner (2010) schätzt den Anteil des parallelisierbaren Teils bei der modellbasierten Prozessmodellierung mit BlueM.Opt auf mindestens 95 %. Dem Amdahlschen Gesetz folgend liegt somit der Geschwindigkeitsgewinn bei einem Computer mit acht Prozessoren bei einem Faktor von 6.

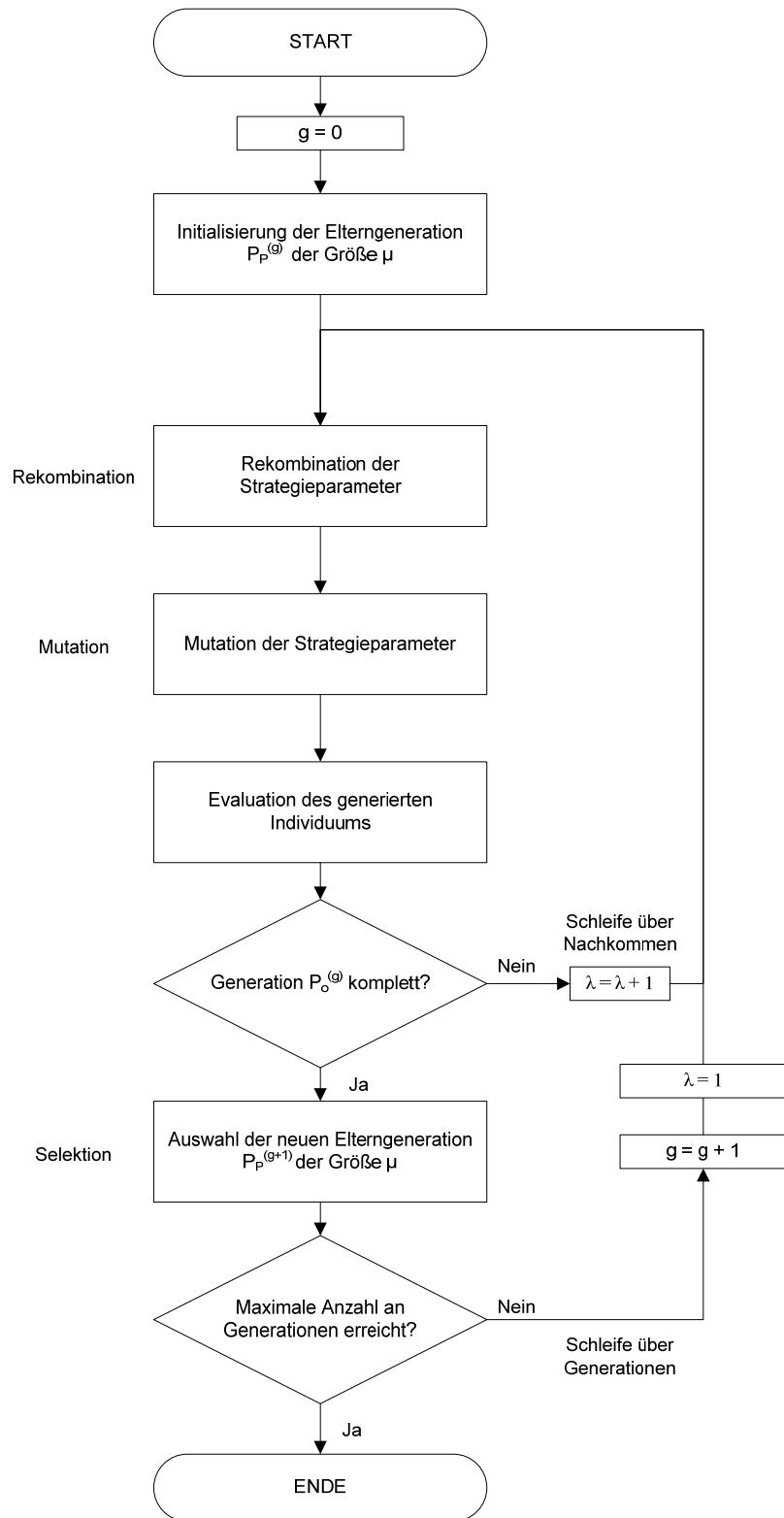


Abbildung 4.6: Fließschema der Evolutionsstrategien

4.1.3. Prozessmodellierung mit SWMM5

Als Prozessmodell wird in BlueM.MPC die Software SWMM5 (Rossman, 2008) verwendet. SWMM5 ist ein dynamisches Niederschlag-Abfluss-Modell für überwiegend urbane Flächen, das zur Simulation von Einzelereignissen und zur kontinuierlichen Langzeitsimulation eingesetzt werden kann. Mit SWMM5 kann neben dem Abfluss auch der Stofftransport simuliert werden. SWMM5 ist eine Open-Source-Software der US-EPA⁸. Es ist das weltweit am meisten verwendete Simulationsmodell zur hydrodynamischen Kanalnetzrechnung und in Forschung und Praxis anerkannt.

SWMM5 hält die Forderungen ein, die an Prozessmodelle speziell für die modellprädiktive Steuerung gestellt werden (siehe Kapitel 3.3): Es ermöglicht das Abspeichern und Bereitstellen von Systemzuständen (über sogenannte „Hotstart“-Dateien) sowie die zeitabhängige Kontrolle von Steuerorganen (über die in SWMM5 implementierten Kontrollfunktionen).

Für die Lösung der St.-Venant-Gleichungen verwendet SWMM5 ein explizites Finite-Differenzen-Verfahren. Eine ausführliche Beschreibung des Lösungsverfahrens liefert Rossman (2006). Demnach basiert die Lösung auf einem Mehrschrittverfahren und einer Knoten-Kanten-Abbildung des Netzwerks, wie sie in Abbildung 4.7 dargestellt ist. Für die Modellierung der Sonderbauwerke stehen Speicherschächte und hydraulische Elemente wie z.B. Wehre, Schieber oder Pumpen zur Verfügung.

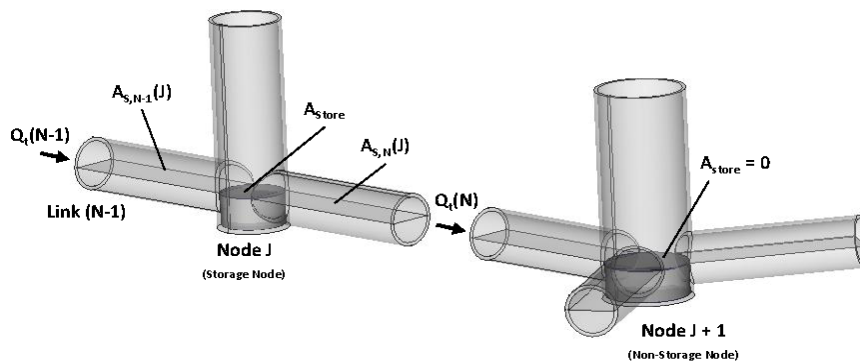


Abbildung 4.7: Repräsentation des Kanalnetzes in SWMM5 (Rossman (2006), verändert)

Bei der iterativen Lösung der diskretisierten Differentialgleichungen wird die Kontinuitätsgleichung (Gl. 2.2) für die Knoten (Schächte) und die Bewegungsgleichung (Gl. 2.1) für die Kanten (Haltungen) verwendet. Sonderbauwerke werden entweder durch den Benutzer über Kennlinien vorgegeben (z.B. als Pumpenkennlinien) oder mit Hilfe von hydraulischen Ersatzgleichungen berechnet (z.B. Wehrüberfälle oder Ausfluss aus Öffnungen).

⁸ Die „US Environmental Protection Agency (US-EPA)“ ist die us-amerikanische Regierungsbehörde zum Schutz der Natur und der menschlichen Gesundheit.

Für die Simulation von Schmutzstoffen können beliebige Stoffe definiert werden. Der Stofftransport in den Haltungen sowie in den Speicherschächten wird auf der Basis von Mischreaktoren („Rührkesselmodell“) berechnet. In Speicherschächten besteht darüber hinaus die Möglichkeit, den einzelnen Stoffen Abbauprozesse zuzuweisen.

4.2. Zusammenfassung

Mit BlueM.MPC wurde eine Software für die modellprädiktive Steuerung mit dem hydrodynamischen Kanalnetzmodell SWMM5 entwickelt. Für die Optimierung wurde das Modul BlueM.Opt implementiert, so dass zur Ermittlung der optimalen Steuerungsentscheidungen ausschließlich direkte Optimierungsmethoden eingesetzt werden können. Die Verwendung von BlueM.Opt ermöglicht den Einsatz verschiedener lokaler und globaler Methoden, wodurch die eingangs formulierte Frage nach der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Optimierungsmethoden untersucht werden kann. BlueM.MPC ist ein Ingenieurwerkzeug, dessen Anwendung vergleichsweise einfach ist, da neben den üblichen Eingabedaten zur Parameteroptimierung und zur hydraulischen Simulation nur wenige zusätzliche Informationen und Daten für die Steuerung erforderlich sind. Die Software eignet sich insbesondere für die simulationsbasierte Quantifizierung des Steuerungspotenzials von Entwässerungssystemen.

5. Anwendungsbeispiele

In diesem Kapitel werden die Berechnungsergebnisse von BlueM.MPC für drei Fallbeispiele vorgestellt. Für das erste Fallbeispiel liegen zudem Ergebnisse und Rechenzeiten für Berechnungen mit der Software Lamatto vor, einem Werkzeug für modellprädiktive Steuerungen auf der Basis eines indirekten Optimierungsverfahrens. Die Rechenzeiten sämtlicher Fallbeispiele wurden zur Abschätzung der Frage verwendet, ob und in welcher Größenordnung der Einsatz der modellprädiktiven Steuerung mit hydrodynamischen Modellen in der Praxis realistisch ist. Die Diskussion der Rechenzeiten erfolgt in Kapitel 6.

5.1. Fallbeispiel 1

Die generelle Funktionalität der Software wurde anhand eines einfachen Entwässerungssystems getestet. Das System hat die gleiche Struktur wie das Beispielnetz der Software „Kanalnetzdemostrator“ (Schütze et al., 2007). Der Kanalnetzdemostrator wurde im Auftrag der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) entwickelt, um der Öffentlichkeit das Thema Abflusssteuerung transparenter zu machen. Das Programm kann als Freeware aus dem Internet heruntergeladen werden.

5.1.1. Systembeschreibung

Das System besteht aus zwei Teileinzugsgebieten, zwei Regenüberlaufbecken und nur wenigen Schächten und Haltungen (Abbildung 5.1). Beide Teileinzugsgebiete besitzen eine unbefestigte Fläche von 60 ha. Das Regenüberlaufbecken B01 besitzt ein maximales Speichervolumen von 1.600 m³ und einen Drosselabfluss von 45 l/s⁽⁹⁾ (im ungesteuerten Zustand), Becken B02 ein Volumen von 1.800 m³ und einen Drosselabfluss von 120 l/s.

Zur Belastungsermittlung wurden für beide Gebiete unterschiedliche Regenreihen angesetzt. Der Simulationszeitraum beträgt drei Tage. Die Niederschlagshöhe im Teileinzugsgebiet T01 beträgt 13,5 mm, im Gebiet T02 21,4 mm. Die Verteilung der Niederschläge¹⁰ sowie die daraus berechneten Abflussganglinien sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Als Trockenwetterabfluss wurden bei beiden Gebieten 15 l/s angesetzt, die mit einem für eine Kleinstadt typischen Tagesgang skaliert wurden.

⁹ Die Beckengrößen und Drosselabflüsse wurden gegenüber dem Kanalnetzdemostrator verändert, um ein größeres Steuerungspotenzial zu generieren. Obwohl der optimale Drosselabfluss für das ungesteuerte System bei den verwendeten Regenreihen 47 l/s beträgt, wurden in den Referenzrechnungen 45 l/s angesetzt. Die Unterschiede sind minimal.

¹⁰ Die Niederschlagsdaten wurden freundlicherweise durch ifak (Magdeburg) bzw. dem Wupperverband zur Verfügung gestellt.

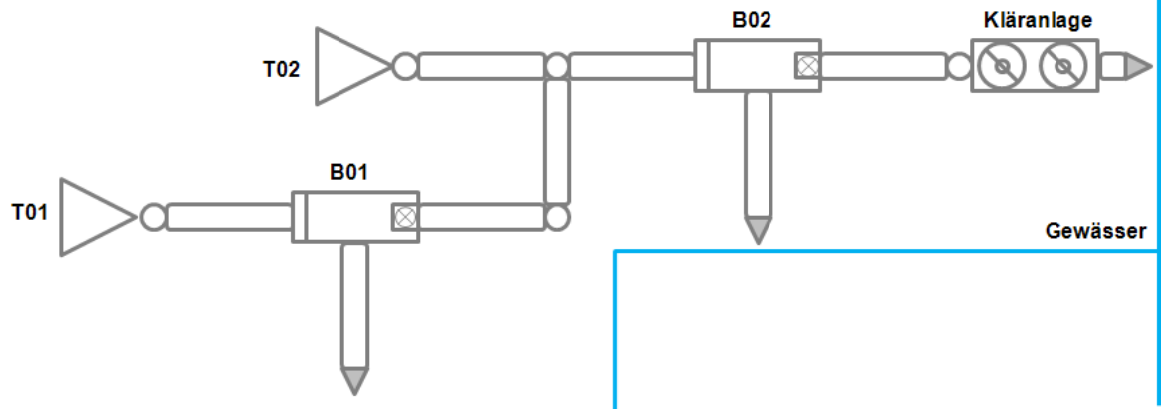


Abbildung 5.1: Fallbeispiel 1 – Systemskizze

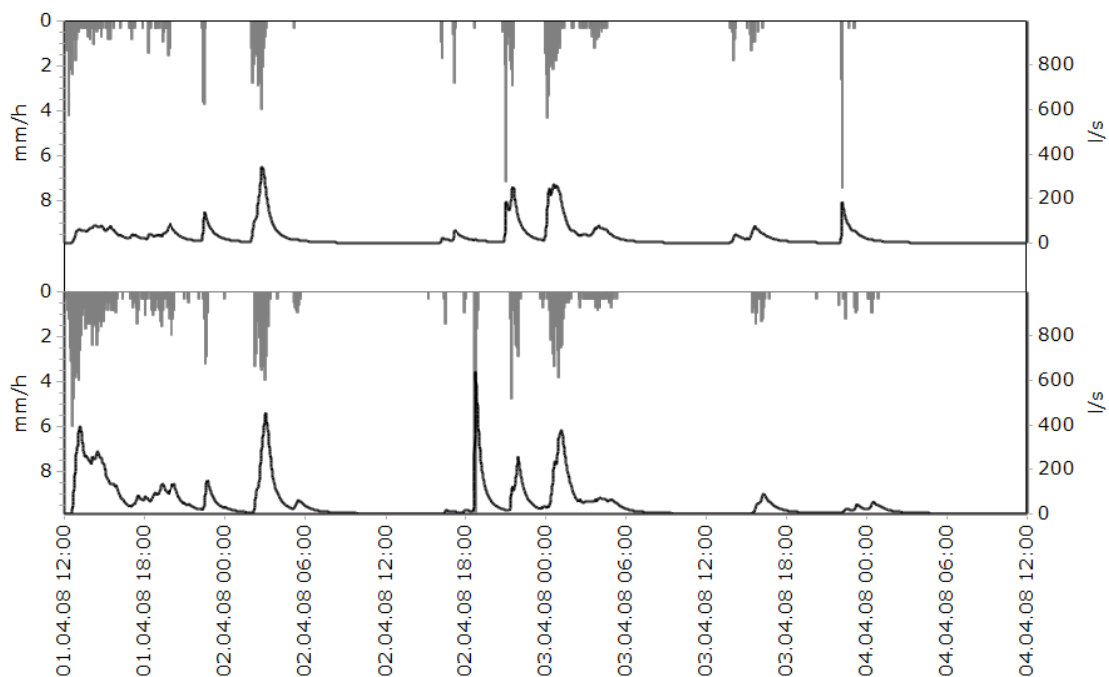


Abbildung 5.2: Fallbeispiel 1 – Niederschläge und Abflussganglinien für T01 (oben) und T02 (unten)

In Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 sind die Ganglinien für die Beckenvolumina und die Abflüsse aus beiden Regenüberlaufbecken für den ungesteuerten Fall dargestellt. Diese dienen als Referenz für die Berechnung mit BlueM.MPC. Abbildung 5.3 enthält die Ganglinien für Becken B01. Es ist zu erkennen, dass das Becken immer ausreichend gefüllt ist, um den Drosselabfluss konstant auf 45 l/s zu halten. Am 3.4. kommt es zwischen 00:00 Uhr und 06:00 Uhr zu zwei Entlastungsereignissen. Am Becken B02 kommt es zwischen dem 1.4. um 12:00 Uhr und dem 2.4. um 06:00 Uhr zu drei Entlastungsereignissen, danach verringert sich der Zufluss zum Becken, so dass es am 2.4. gegen 16:00 Uhr für

einige Stunden leer läuft und der Drosselabfluss vermindert wird. Insgesamt werden 1.358 m³ entlastet, davon 231 m³ am Becken B01 und 1.127 m³ am Becken B02.

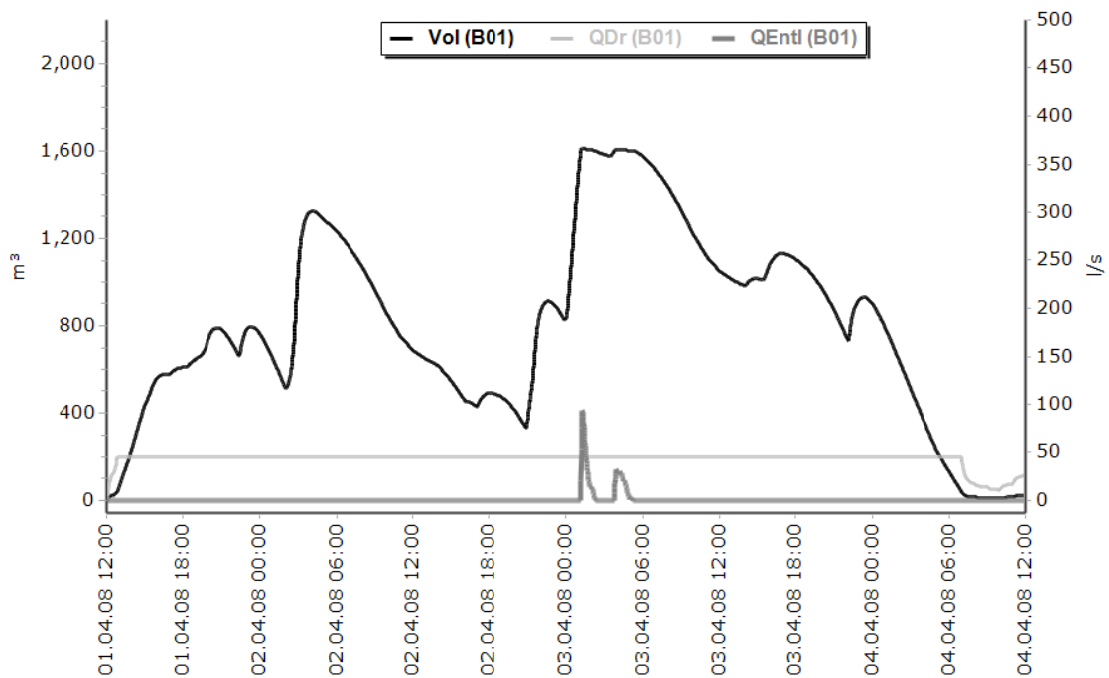


Abbildung 5.3: Fallbeispiel 1 – Volumen- und Abflussganglinien für B01 (ungesteuertes System)

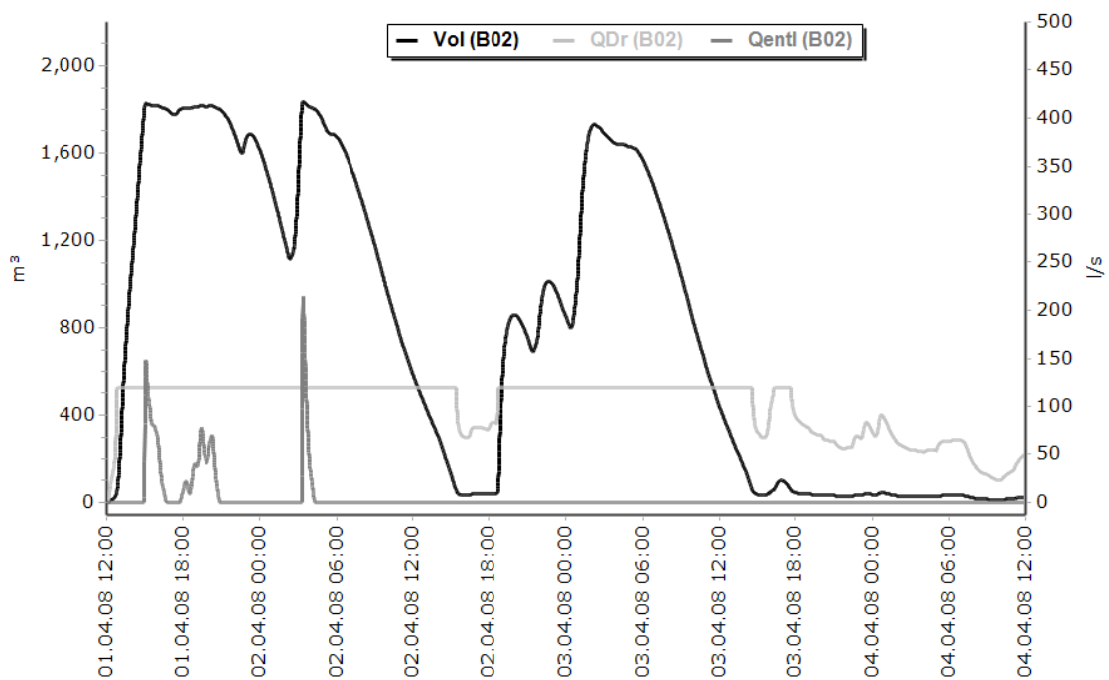


Abbildung 5.4: Fallbeispiel 1 – Volumen- und Abflussganglinien für B02 (ungesteuertes System)

Das System wird auch zum Testen der schmutzfrachtbasierten Steuerung eingesetzt. Als Schmutzstoffparameter dient der chemische Sauerstoffbedarf (CSB), ein Summenparameter als Maß der organischen Verschmutzung. Für die Berechnung der Stoffkonzentrationen, die von der Oberfläche sowie durch häusliches und gewerbliches Schmutzwasser ins Kanalnetz eingetragen werden, wurden Standardansätze gewählt, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll. Um möglichst heterogene Zuflussfrachten zu generieren, wurden für beide Teileinzugsgebiete unterschiedliche Faktoren für den niederschlagsbedingten Schmutzstoffabtrag sowie unterschiedliche Tagesgänge für die Schmutzstoffkonzentrationen der Trockenwetterzuflüsse angesetzt.

5.1.2. Abflussbasierte Steuerung

Lokales Optimierungsverfahren

Zunächst wird die generelle Funktionalität der modellprädiktiven Steuerung getestet. Als Steuerungsziel wird die Minimierung des gesamten Entlastungsvolumens, d.h. die Summe der Entlastungsabflüsse an beiden Becken B01 und B02, angesetzt. Ein zusätzlicher Strafterm wird für das Beckenvolumen von B01 eingebaut, um zu gewährleisten, dass das Becken auch geleert wird, wenn keine Entlastung registriert wird. Steuerungsgröße (und damit auch Optimierungsgröße) ist der Drosselabfluss von B01, der zwischen 0 und 90 l/s variieren kann. Für die Simulationen werden ideale Bedingungen angenommen. Sowohl für den Evaluierungshorizont als auch für den Vorhersagehorizont werden vier Stunden angesetzt und es wird davon ausgegangen, dass die Prognoserechnungen für die Zuflussganglinien perfekt sind. Als Kontrollhorizont wird eine Stunde angesetzt. Der Steuerungszeitschritt beträgt 10 Minuten.

Da lediglich für ein Steuerorgan optimale Entscheidungen gesucht werden, muss in jedem Steuerungszeitschritt ein Optimierungsproblem mit fünf Optimierungsparametern gelöst werden. Die Zeithorizonte sind in Abbildung 5.5 noch einmal grafisch dargestellt.

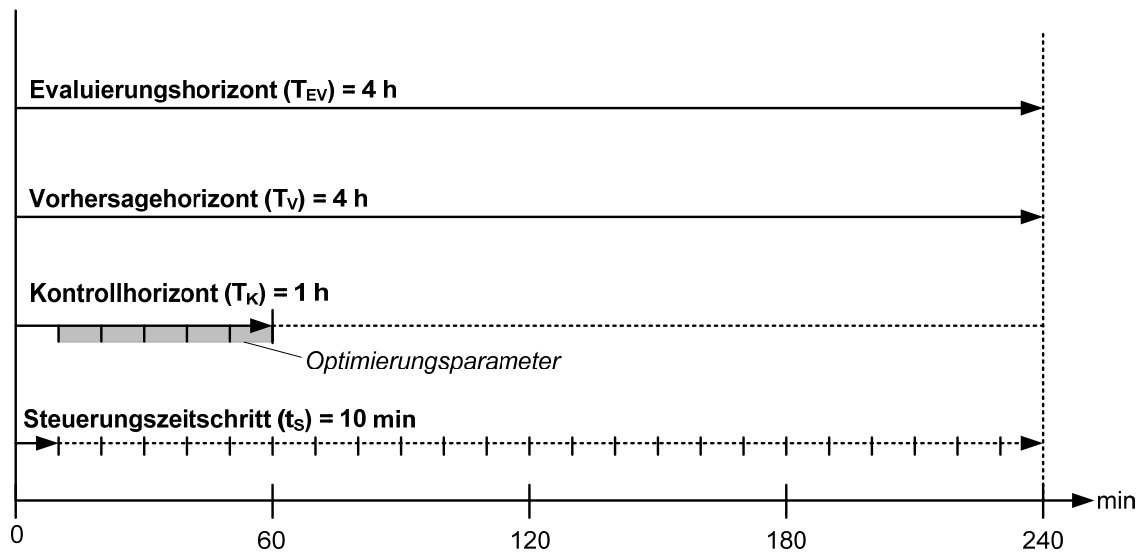


Abbildung 5.5: Fallbeispiel 1 – Grafische Darstellung der Zeithorizonte

In der ersten Berechnung wird das Optimierungsverfahren von Hooke & Jeeves zur Ermittlung der Steuerungsentscheidungen verwendet. Die Methode ist erfolgreich, durch die Steuerung verringert sich das Gesamtentlastungsvolumen von 1.358 m³ auf 843 m³ (Tabelle 5.1).

	Referenzsystem	Gesteuertes System (Hooke & Jeeves)
B01	231 m ³	7 m ³
B02	1.127 m ³	835 m ³
Gesamt	1.358 m ³	842 m ³

Tabelle 5.1: Fallbeispiel 1 - Vergleich der Entlastungsabflüsse zwischen Referenzsystem und H&J-Steuerung

In Abbildung 5.6 sind die Volumen- und Abflussganglinien für Becken B01 dargestellt. Zum Vergleich dienen die Ganglinien des ungesteuerten Becken in Abbildung 5.3. Folgende Auswirkungen der Steuerung sind zu erkennen:

- Es treten lediglich zwei kleine Entlastungsereignisse (am 1.4. um 20:00 Uhr sowie am 2.4. um 4:00 Uhr) auf; das Entlastungsvolumen beträgt lediglich 7 m³ (gegenüber dem des ungesteuerten Systems von 213 m³).
- Der Drosselabfluss besitzt eine ausgeprägte Dynamik. Die zur Verfügung stehende Spanne von 0 bis 90 l/s wird vollständig ausgenutzt.
- Das Beckenvolumen wird besser ausgenutzt. Der Speicher wird von Beginn an gefüllt und in Zeiträumen mit geringem Zufluss (ab 2.4. 6:00 Uhr sowie ab 3.4. 6:00 Uhr) möglichst schnell geleert.

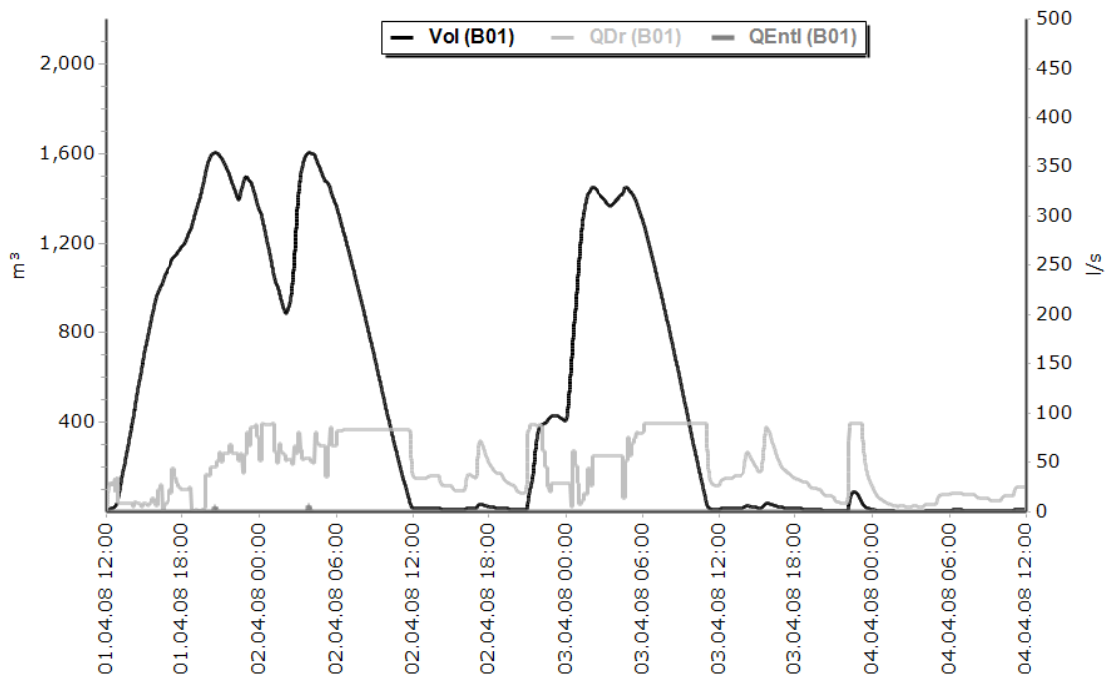


Abbildung 5.6: Fallbeispiel 1 – Volumen- und Abflussganglinien für B01 (H&J-Steuerung)

Bei Becken B02 lässt sich folgendes beobachten (Abbildung 5.7, vgl. mit den Ganglinien des ungesteuerten Systems in Abbildung 5.4):

- Es kommt zu zwei sehr kleinen und einem großen Entlastungsereignis (am 1.4. um 21:00 Uhr, am 2.4. um 0:00 Uhr und am 2.4. um 3:00 Uhr). Das gesamte Entlastungsvolumen ist aber trotz der größeren Entlastungsspitze deutlich geringer als das des ungesteuerten Systems (835 m^3 gegenüber 1.127 m^3).
- Das Beckenvolumen wird ebenfalls besser ausgenutzt. Der Speicher wird zwischenzeitlich zwar nicht vollständig geleert (am 2.4. um 18:00 Uhr). Dies hat aber keine Konsequenzen, da in der folgenden Füllphase das maximale Volumen von 1.800 m^3 nicht überschritten wird.
- Der Spitzenabfluss der Entlastung ist etwa doppelt so groß wie die des ungesteuerten Systems. Aus immissionsorientierter Sicht, bei der eine Erhöhung der Abflussspitzen unerwünscht ist, ist dies eine klare Verschlechterung.

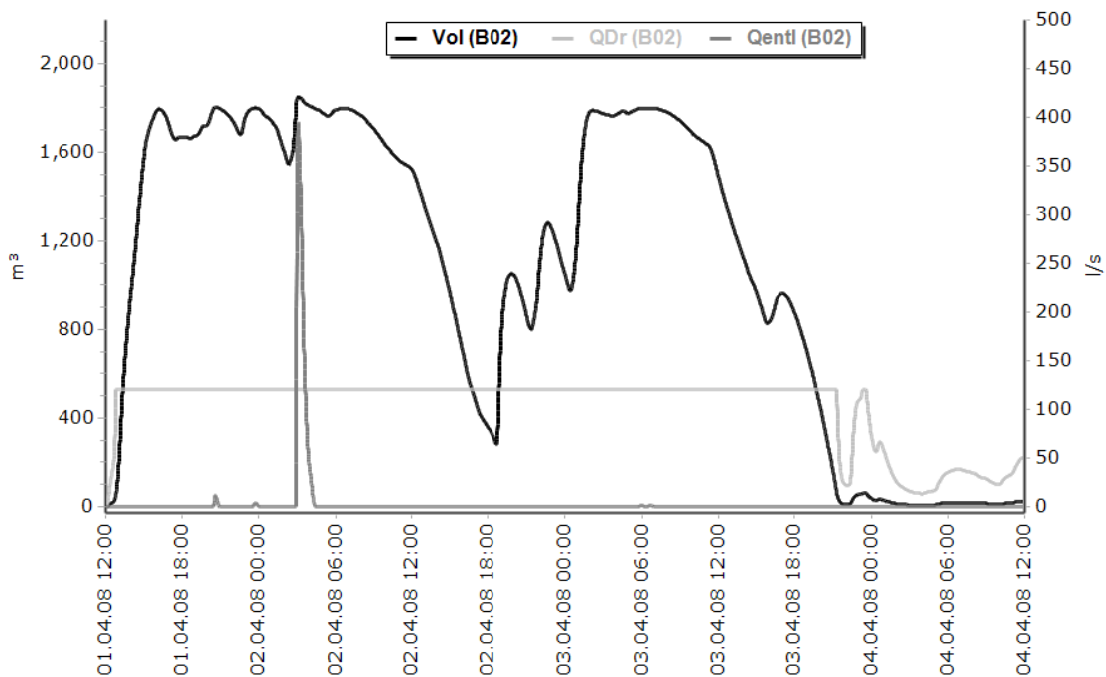


Abbildung 5.7: Fallbeispiel 1 – Volumen- und Abflussganglinien für B02 (H&J-Steuerung)

Globales Optimierungsverfahren

Für den Vergleich zwischen dem lokalen und globalen Optimierungsverfahren sind im Folgenden zusätzlich die Ergebnisse für die Berechnung mit den Evolutionsstrategien aufgeführt. Die Berechnungen wurden unter den gleichen Voraussetzungen durchgeführt, d.h. sowohl für den Evaluierungs- als auch für den Vorhersagehorizont wurden vier Stunden angesetzt, für den Kontrollhorizont wurde eine Stunde bei einem Steuerungszeitschritt von zehn Minuten angesetzt.

Bei den Berechnungen mit den Evolutionsstrategien muss berücksichtigt werden, dass es sich um stochastische Verfahren handelt. Im Gegensatz zum deterministischen Verfahren von Hooke & Jeeves, das unter den gleichen Anfangs- und Nebenbedingungen immer die gleichen Steuerungsergebnisse ermittelt, können die Ergebnisse der Optimierungsläufe bei den Evolutionsstrategien voneinander abweichen. Entscheidend für den Erfolg ist die Anzahl der Zielfunktionsauswertungen, d.h. der Generationen und der Nachkommen einer Generation.

Auch in diesem Beispiel ergaben mehrfache Berechnungen unter den gleichen Bedingungen unterschiedliche Ergebnisse. Diese Unterschiede waren allerdings gering, da es sich um ein einfaches Steuerungsproblem handelt und die Anzahl der Zielfunktionsauswertungen ausreichend groß war, um in allen Fällen eine gute Lösung zu garantieren. Gerechnet wurde mit 25 Generationen und 10 Nachkommen, so dass insgesamt in jedem Steuerungszeitschritt 250 Zielfunktionsauswertungen mit dem Prozessmodell durchgeführt wurden.

In Tabelle 5.2 sind die Berechnungsergebnisse von fünf Simulationen aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung von Evolutionsstrategien ebenfalls zu einer deutlichen Reduzierung des Gesamtentlastungsvolumens führt.

	<i>Referenz-system</i>	<i>PES (No1)</i>	<i>PES (No2)</i>	<i>PES (No3)</i>	<i>PES (No4)</i>	<i>PES (No5)</i>
<i>B01</i>	231 m ³	60 m ³	33 m ³	66 m ³	48 m ³	0 m ³
<i>B02</i>	1.127 m ³	783 m ³	808 m ³	776 m ³	796 m ³	844 m ³
<i>Gesamt</i>	1.358 m ³	843 m ³	841 m ³	842 m ³	844 m ³	844 m ³

Tabelle 5.2: Fallbeispiel 1 - Vergleich der Entlastungsabflüsse zwischen ungesteuertem System und PES-Steuerung

Für die Darstellung der Ganglinien werden die Berechnungsergebnisse des ersten Simulationslaufs verwendet (Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9).

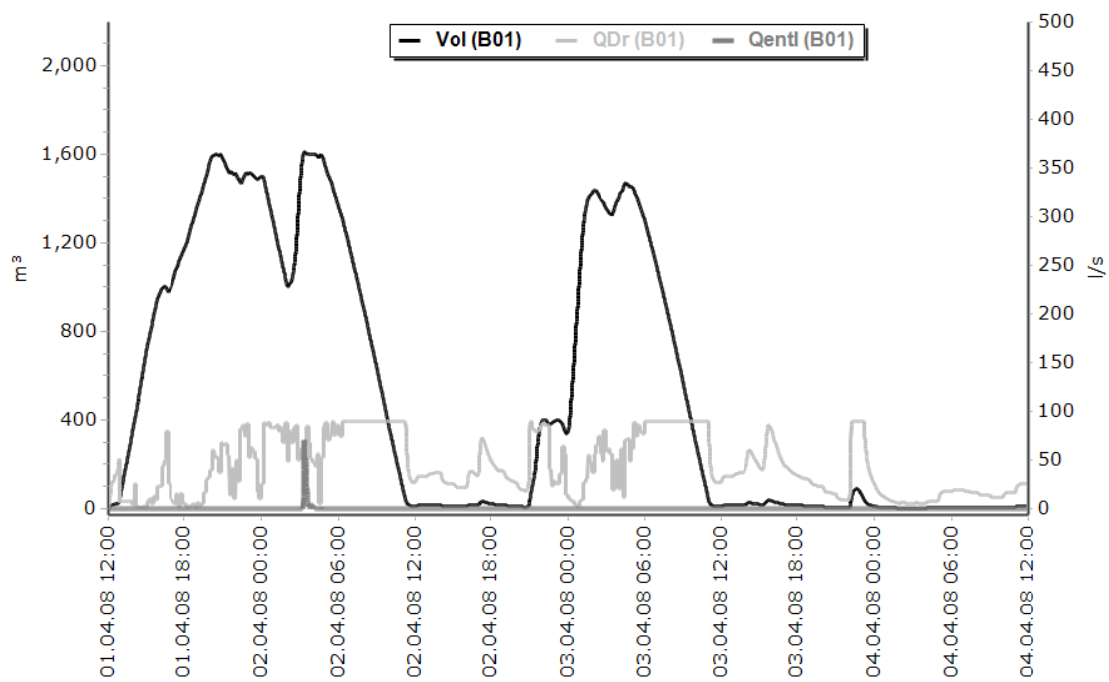


Abbildung 5.8: Fallbeispiel 1 – Ganglinien für Regenüberlaufbecken B01 (PES-Steuerung)

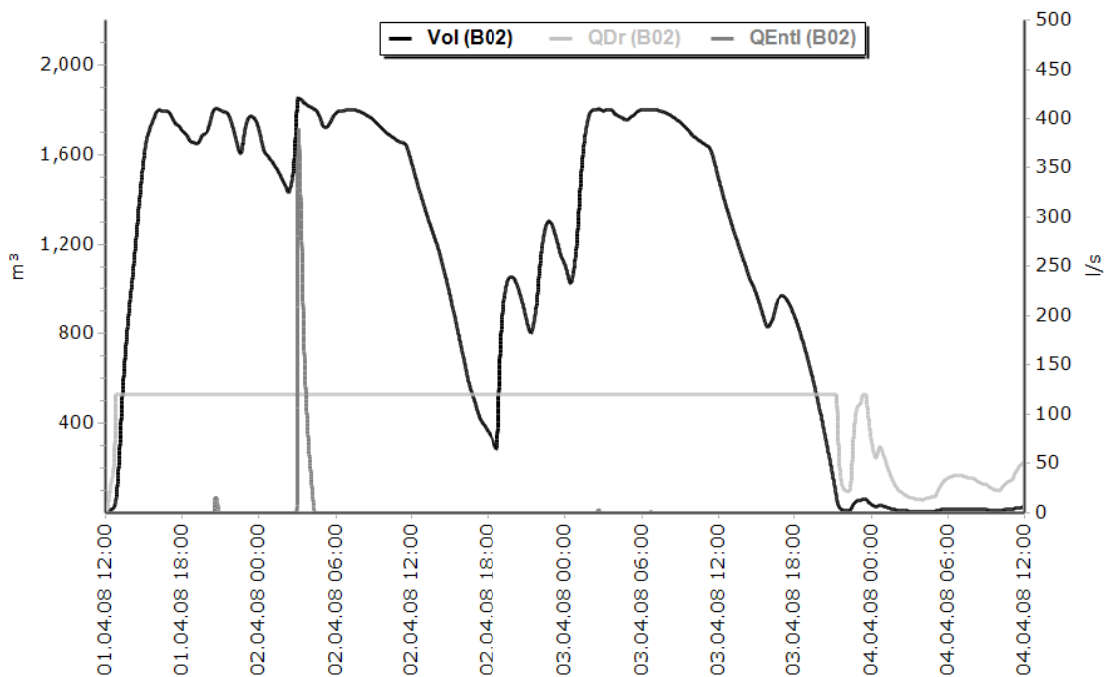


Abbildung 5.9: Fallbeispiel 1 – Ganglinien für Regenüberlaufbecken B02 (PES-Steuerung)

Vergleich der Optimierungsverfahren

Die Berechnungen zeigen, dass beide Verfahren in der Lage sind, die Entlastungsvolumina deutlich zu reduzieren. Das Gesamtentlastungsvolumen ist in beiden Fällen fast gleich groß (842 m³ bzw. 843 m³). Legt man für den Vergleich die Berechnungsergebnisse des ersten Simulationslaufs mit den Evolutionsstrategien zugrunde, lässt sich erkennen, dass die Verteilung der Entlastungsabflüsse auf beide Becken jedoch unterschiedlich sein kann (siehe Tabelle 5.3): Das Entlastungsvolumen bei Becken B01 ist mit 60 m³ etwas höher, und bei B02 mit 783 m³ etwas niedriger gegenüber der Steuerung mit Hooke & Jeeves. Zusammenfassend lässt sich folgendes feststellen:

- Die Steuerungsentscheidungen beider Verfahren weisen über den gesamten Simulationszeitraum betrachtet die gleiche Charakteristik auf. Beide Verfahren erkennen, dass das Beckenvolumen bei B01 zu Beginn nicht optimal ausgenutzt wird. Durch die Reduzierung der Drosselabflüsse kann bei B01 mehr Speichervolumen aktiviert werden, damit Entlastungen bei B02 verhindert werden.
- Die Dynamik der optimierten Drosselabflüsse ist bei den Evolutionsstrategien größer. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass es sich bei den Evolutionsstrategien um stochastische Suchverfahren handelt. Für die praktische Umsetzung ist dieses Verhalten nachteilig, da hierdurch eine größere Belastung der Stellorgane hervorgerufen wird.
- Beide Steuerungen erhöhen den Spitzenabfluss der Entlastung am Becken B02 deutlich. Aus immissionsorientierter Sicht ist dies nicht sinnvoll. Zur Vermeidung dieses Effektes

müsste der Spitzenabfluss der Entlastung in die Zielfunktion integriert werden. Dies ist mit BlueM.MPC möglich, wurde aber im Rahmen dieser Berechnungen nicht berücksichtigt.

	<i>Referenzsystem</i>	<i>Hooke & Jeeves</i>	<i>PES</i>
<i>B01</i>	231 m ³	7 m ³	60 m ³
<i>B02</i>	1.127 m ³	835 m ³	783 m ³
<i>Gesamt</i>	1.358 m ³	842 m ³	843 m ³

Tabelle 5.3: Fallbeispiel 1 – Vergleich der Entlastungsvolumina des ungesteuerten Systems mit lokalem und globalem Optimierungsalgorithmus

5.1.3. Schmutzfrachtbasierte Steuerung

Einfache Mischungsrechnung

Bei den ersten Berechnungen für die schmutzfrachtbasierten Steuerungen werden zunächst ausschließlich Mischungsrechnungen durchgeführt, d.h. Abbauprozesse in den Rückhaltebecken werden nicht berücksichtigt. Als Steuerungsziel wird die Minimierung der Entlastungsfrachten definiert. In Analogie zum Fallbeispiel in Kapitel 5.1 werden die gleichen Zeithorizonte für die modellprädiktive Steuerung angesetzt (siehe Abbildung 5.5).

Die Berechnungsergebnisse für die Simulationen sind in Tabelle 5.4 zusammengestellt. Für die Steuerung mit den Evolutionsstrategien wurden wieder mehrere Simulationsläufe durchgeführt, deren Ergebnisse sich aber nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Im Folgenden sind daher lediglich die Ergebnisse der ersten Simulation aufgeführt. Als Vergleichsgrundlage sind zusätzlich die Entlastungsvolumina und –frachten des Referenzsystems und der abflussbasierten Steuerungen aufgeführt.

	<i>B01</i>		<i>B02</i>		<i>Gesamt</i>	
	<i>Q_{entl}</i>	<i>SF_{entl}</i>	<i>Q_{entl}</i>	<i>SF_{entl}</i>	<i>Q_{entl}</i>	<i>SF_{entl}</i>
<i>Referenz</i>	231 m ³	18,8 kg	1.127 m ³	204,6 kg	1.358 m ³	223,4 kg
Abflussbasierte Steuerung						
<i>H&J</i>	7 m ³	1,4 kg	835 m ³	87,1 kg	842 m ³	88,5 kg
<i>PES</i>	60 m ³	6,8 kg	783 m ³	79,0 kg	843 m ³	85,8 kg
Schmutzfrachtbasierte Steuerung (ohne Absetzwirkung)						
<i>H&J</i>	76 m ³	9,4 kg	763 m ³	72,4 kg	839 m ³	81,8 kg
<i>PES</i>	81 m ³	10,1 kg	763 m ³	73,1 kg	844 m ³	83,2 kg

Tabelle 5.4: Fallbeispiel 1 – Ergebnisse der schmutzfrachtbasierten Steuerung bei einfacher Mischungsrechnung

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Entlastungsfracht durch die Steuerung unabhängig vom Steuerungsziel deutlich vermindert wird. Dies gilt sowohl für die

Berechnungen mit Hooke & Jeeves als auch für die Evolutionsstrategien. Durch die schmutzfrachtbasierte Steuerung kann die Entlastungsfracht gegenüber der abflussbasierten Steuerung noch weiter reduziert werden (auf 81,8 kg durch die Steuerung mit Hooke & Jeeves bzw. auf 83,2 kg durch die PES-Steuerung). Hervorgerufen wird dies allerdings nicht durch eine Veränderung der Charakteristik der Steuerungsentscheidungen – Anzahl und Zeitpunkt der Entlastungsereignisse bleiben gleich – sondern durch lediglich geringfügige Änderungen von Entlastungsort und -zeitpunkt. Zur Dokumentation dienen die folgenden beiden Abbildungen, bei denen im oberen Teil die Summenlinien der Schmutzfrachten und im unteren Teil die dazugehörigen Entlastungsabflüsse dargestellt sind. In Abbildung 5.10 sind die Ganglinien für die abflussbasierte Steuerung, in Abbildung 5.11 für die schmutzfrachtbasierte Steuerung dargestellt.

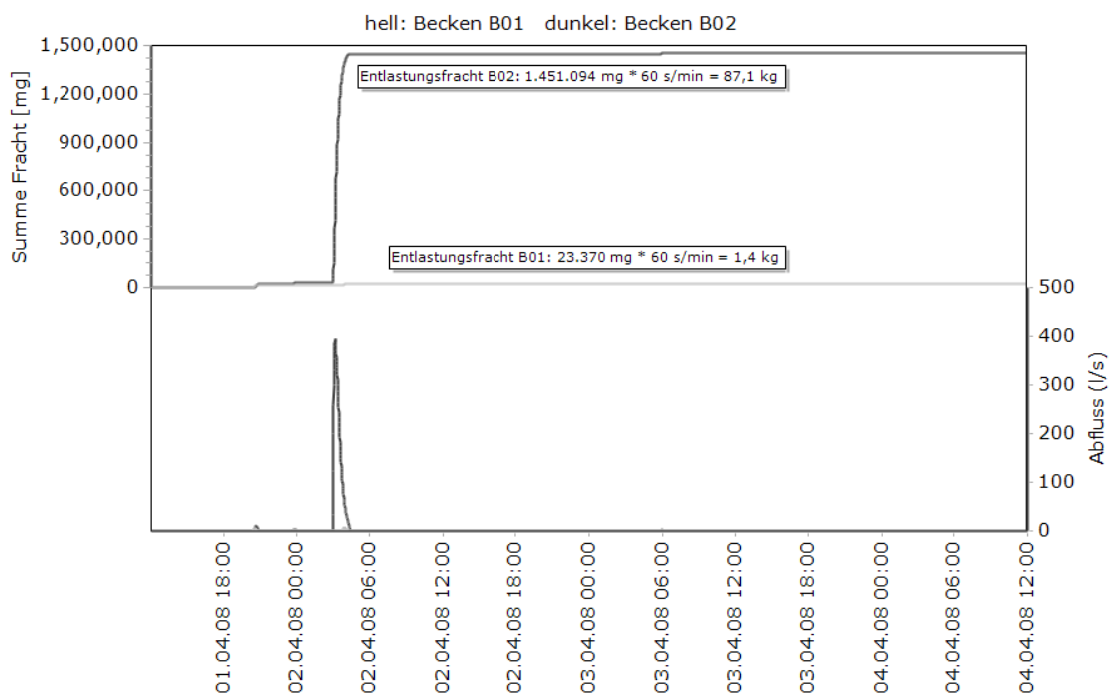


Abbildung 5.10: Fallbeispiel 1 – Entlastungsabflüsse (unten) und Frachtsummen (oben) für beide Becken bei der abflussbasierten Steuerung (H&J)

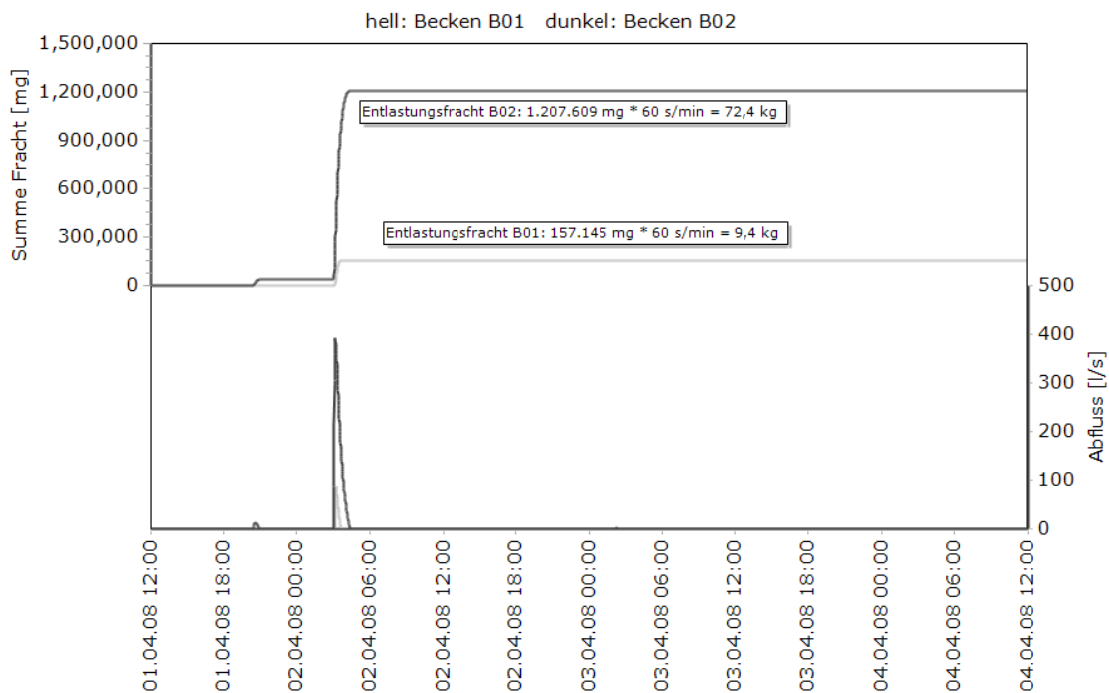


Abbildung 5.11: Fallbeispiel 1 – Entlastungsabflüsse (unten) und Frachtsummen (oben) für beide Becken bei der schmutzfrachtbasierten Steuerung (H&J)

Bei der Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 5.4 fallen darüber hinaus zwei Sachverhalte auf:

- Die Verminderung der Schmutzfrachtentlastung ist in allen Fällen – auch bei der abflussbasierten Steuerung – deutlich größer als die der Entlastungsvolumina. Begründet ist dies durch die unterschiedlichen Zeitpunkte der Entlastung und die unterschiedlichen Schmutzkonzentrationen des Regen- und des Schmutzwassers. Im ungesteuerten System wird am Becken B02 ein wesentlicher Anteil zu Beginn des ersten Regenereignisses entlastet. In dieser Phase ist die Mischwasserkonzentration durch den Schmutzabtrag von der Oberfläche höher als zu späteren Zeitpunkten. In den gesteuerten Systemen dagegen wird zu späteren Zeitpunkten entlastet.
- Bei der schmutzfrachtbasierten Steuerung mit Hooke & Jeeves ist das Entlastungsvolumen geringfügig geringer als bei der abflussbasierten Steuerung (839 m^3 gegenüber 842 m^3). Offensichtlich führt die alternative Formulierung der Zielfunktion zu einem besseren Abstiegsverhalten bei der Optimierung.

Berücksichtigung der Absetzwirkung

In der folgenden Variante wird das gleiche System zu Grunde gelegt, bei den Regenüberlaufbecken werden allerdings Retentionseffekte für die CSB-Konzentrationen angesetzt. Hiermit soll das Absetzen von partikulären Schmutzstoffen und der an diese gebundenen CSB-Anteile simuliert werden.

Der Schmutzstoffrückhalt wird durch die Absetzgeschwindigkeit von partikulären Stoffen reguliert und als Exponentialfunktion in Abhängigkeit von Sinkgeschwindigkeit und Wassertiefe berechnet. Die Hintergründe des Berechnungsansatzes können Muschalla et al. (2009) entnommen werden. Für die entsprechende Modellierung in SWMM5 wird Gleichung 5.1 für die Berechnung der Ablauf- und Entlastungskonzentration in den Regenüberlaufbecken verwendet. Um möglichst heterogene Entlastungskonzentrationen zu generieren, werden für beide Becken unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten angesetzt¹¹. Für B01 wird mit einer Geschwindigkeit von 0,0005 m/s, für B02 mit 0,005 m/s gerechnet. Hierdurch ist die Stoffretention in B02 größer als die in B01.

$$c_{ab} = c_{Bek} * e^{\frac{-v_s t}{h}} \quad \text{Gl. 5.1}$$

mit:

c_{ab}	Stoffkonzentration in Ablauf und Entlastung	[mg/l]
c_{Bek}	Stoffkonzentration im Becken	[mg/l]
v_s	Sinkgeschwindigkeit	[m/s]
h	Wassertiefe im Becken	[m]
t	Zeitkoordinate	[s]

Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 5.5 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass beide Optimierungsverfahren wieder ähnlich gute Ergebnisse erzielen. Beide Verfahren erkennen die schlechtere Abbauleistung von B01 und vermeiden dort entsprechend jegliche Entlastungen. Die Unterschiede der Entlastungsfrachten bei B02 sind minimal (0,08 kg bei Hooke & Jeeves und 0,03 kg bei den Evolutionsstrategien).

	B01		B02		Gesamt	
	Q_{entl}	SF_{entl}	Q_{entl}	SF_{entl}	Q_{entl}	SF_{entl}
Referenz	231 m ³	1,19 kg	1.127 m ³	4,59 kg	1.358 m ³	5,78 kg
Abflussbasierte Steuerung						
H&J	7 m ³	0,16 kg	835 m ³	0,08 kg	843 m ³	0,24 kg
PES	60 m ³	0,23 kg	783 m ³	0,08 kg	843 m ³	0,31 kg
Schmutzfrachtbasierte Steuerung (mit Absetzwirkung)						
H&J	0 m ³	0 kg	1.067 m ³	0,08 kg	1.067 m ³	0,08 kg
PES	0 m ³	0 kg	887 m ³	0,03 kg	887 m ³	0,03 kg

Tabelle 5.5: Fallbeispiel 1 – Ergebnisse der schmutzfrachtbasierten Steuerungen mit Absetzwirkungen

¹¹ Es handelt sich um fiktive Werte, die zur Generierung von möglichst hohem Steuerungspotenzial gewählt wurden. Da es sich bei der Sinkgeschwindigkeit um einen physikalischen Parameter handelt, ist es unwahrscheinlich, dass in den beiden Becken derart deutliche Unterschiede auftreten. Die Absetzwirkung ist zudem deutlich größer, als dies in der Realität zu erwarten ist.

5.1.4. Steuerung durch indirekte Optimierung

Wie bereits in Kapitel 2.4 herausgestellt wurde, existieren bislang keine Ansätze für die modellprädiktive Kanalnetzsteuerung mit hydrodynamischen Modellen auf der Basis von indirekten Optimierungsverfahren. Ein entsprechendes Verfahren wurde erstmals im Rahmen des Forschungsprojektes „Odysseus“ durch den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik II der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt (siehe Kapitel 1.3) und in eine Software mit dem Arbeitstitel Lamatto implementiert. Im Folgenden wird die Leistungsfähigkeit von Lamatto mit der von BlueM.MPC verglichen. Der Vergleich umfasst einerseits die Steuerungsqualität, also die Fähigkeit der Software, optimale Steuerungsentscheidungen im Sinne der definierten Zielfunktion zu ermitteln, und andererseits die erforderlichen Rechenzeiten, die für die Ermittlung der Steuerungsentscheidung benötigt wird. Durch diese Gegenüberstellung soll untersucht werden, ob durch aktuelle mathematische Methoden eine Verbesserung gegenüber den herkömmlichen Ingenieurwerkzeugen herbeigeführt werden kann.

Software Lamatto

Mit der Software Lamatto steht erstmals ein Werkzeug für die modellprädiktive Steuerung auf der Basis eines indirekten Optimierungsverfahrens zur Verfügung. Im Gegensatz zu dem in BlueM.MPC implementierten Optimierungsmodul BlueM.Opt wird die Abstiegsrichtung bei der Optimierung mit Lamatto durch analytische Ableitungsberechnungen ermittelt, d.h. eine strikte Trennung von Optimierungsmodul und Prozessmodell liegt hier nicht mehr vor (siehe Abbildung 5.12).

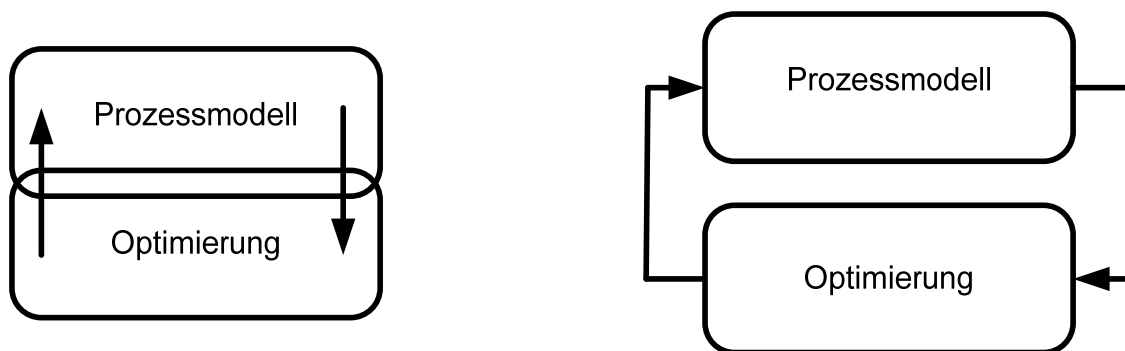


Abbildung 5.12: Vergleich zwischen indirekter Optimierung (links) und direkter Optimierung (rechts)

Für die Prozessmodellierung in Lamatto wurde vom Lehrstuhl für Angewandte Mathematik II ein hydrodynamisches Kanalnetzmodell entwickelt, das für die Lösung der St.-Venant-Gleichungen ein Finite-Volumen-Verfahren verwendet (BMBF, 2010). Die Entwicklung eines Kanalnetzmodells war erforderlich, um die ableitungsbasierte Optimierungsmethode implementieren zu können. Die Finite-Volumen-Methode bietet hierfür einen Vorteil, da sie glatte Lösungen bei der Abflussberechnung produziert. SWMM verwendet eine explizite Finite-Differenzen-Methode, bei der ein ständiger Abgleich zwischen Wasserständen an den Knoten (Schächten) und den Abflüssen auf den Kanten (Haltungen) durchgeführt

wird, wodurch die in Abbildung 5.13 dargestellten Oszillationen entstehen (diese sind nur sichtbar, wenn man den Ganglinienausschnitt stark vergrößert). Für herkömmliche Berechnungen sowie für die Verwendung von direkten Optimierungsverfahren sind die Oszillationen unerheblich, für die Gradientensuche bei indirekten Optimierungsverfahren aber wichtig.

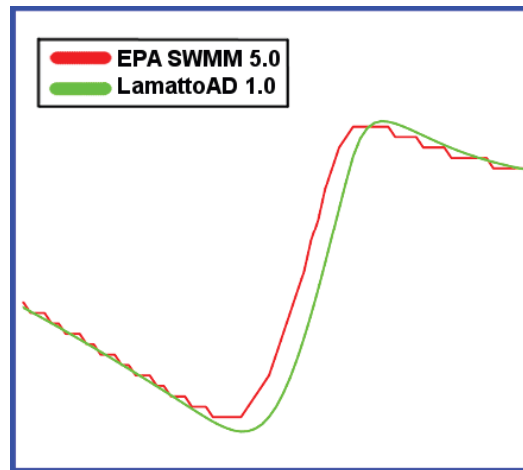


Abbildung 5.13: Vergleich der Abflussganglinien zwischen SWMM und Lamatto (stark vergrößerter Ausschnitt)

Vergleich des ungesteuerten Referenzsystems

Da für die Prozessmodellierung unterschiedliche Berechnungsansätze verwendet werden, werden zunächst die Ergebnisse des ungesteuerten Systems verglichen. Überraschenderweise sind die Unterschiede hinsichtlich der Entlastungsvolumen signifikant (siehe Tabelle 5.6), Lamatto berechnet deutlich geringere Entlastungsmengen. Verursacht wird dies durch den wesentlich stärkeren Einfluss von Rückstauwirkungen bei Lamatto, die z.B. am Zusammenfluss von zwei oder mehr Haltungen oder vor einer hochgezogenen Schwelle eines Entlastungsbauwerks auftreten. Dieser rückwärtige Impuls reduziert die Abflussspitzen in den Folgehaltungen deutlich, was zu geringeren Abschlägen an den Wehrschwellen von Entlastungsbauwerken führt.

	<i>BlueM.MPC</i>	<i>Lamatto</i>
<i>B01</i>	231 m ³	231 m ³
<i>B02</i>	1.127 m ³	887 m ³
<i>Gesamt</i>	1.358 m ³	1.118 m ³

Tabelle 5.6: Fallbeispiel 1 – Vergleich der Entlastungsvolumina zwischen BlueM.MPC und Lamatto (Ungesteuertes System)

Die von Lamatto berechneten Volumen- und Abflussganglinien sind für beide Becken in Abbildung 5.14 dargestellt (vgl. mit den SWMM5-Ganglinien in Abbildung 5.3 und

Abbildung 5.4). Die Ganglinien von Becken B01 sind praktisch identisch, die geringeren Abflussspitzen bei Becken B02 sind deutlich zu erkennen.

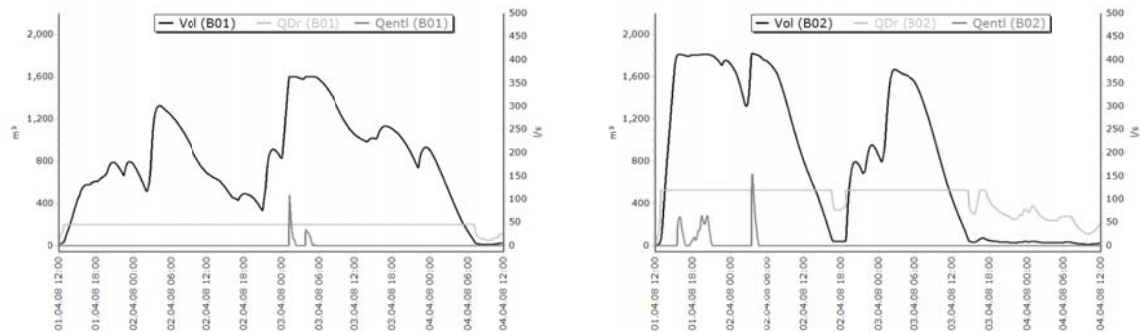


Abbildung 5.14: Fallbeispiel 1 – Mit Lamatto generierte Ganglinien für B01 und B02 (ungesteuertes System)

Vergleich der Steuerungsqualität

Die Steuerungsergebnisse von Lamatto sowie die entsprechenden Vergleichsergebnisse für die Berechnungen mit BlueM.MPC sind in Tabelle 5.7 aufgeführt. Die Reduktion der Entlastungsvolumina liegt bei Lamatto in der gleichen Größenordnung wie bei BlueM.MPC (35 % gegenüber 38 %, die sowohl mit dem Verfahren von Hooke & Jeeves als auch mit den Evolutionsstrategien berechnet werden).

	BlueM.MPC			Lamatto	
	Referenz-system	Gesteuert (H&J)	Gesteuert (PES)	Referenz-system	Gesteuert
B01	231 m ³	7 m ³	60 m ³	231 m ³	231 m ³
B02	1.127 m ³	835 m ³	783 m ³	887 m ³	499 m ³
Gesamt	1.358 m ³	842 m ³	843 m ³	1.118 m ³	730 m ³
Reduktion		38 %	38 %		35 %

Tabelle 5.7: Fallbeispiel 1 – Vergleich der berechneten Entlastungsvolumina zwischen BlueM.MPC und Lamatto

Die dazugehörigen Ganglinien der Lamatto-Berechnung sind in Abbildung 5.15 dargestellt (vgl. mit den Ganglinien der BlueM.MPC-Steuerung in Abbildung 5.6 bis Abbildung 5.9). Die Charakteristik der Ganglinien für die Beckenvolumina und für die Entlastungsabflüsse ist vergleichbar. Bei Becken B02 ist die geringere Abflussspitze des Entlastungsereignisses deutlich zu erkennen. Auffällig ist darüber hinaus, dass die von Lamatto ermittelten Drosselabgaben insgesamt glatter sind.

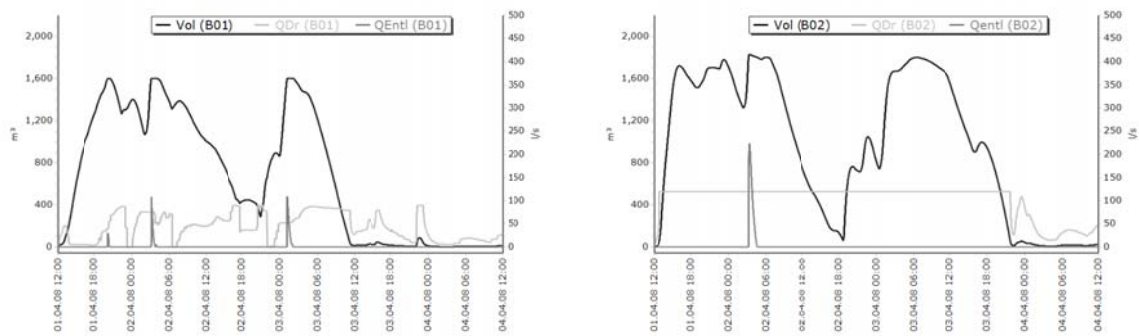


Abbildung 5.15: Fallbeispiel 1 – Mit Lamatto generierte Ganglinien für B01 und B02 (gesteuertes System)

5.2. Fallbeispiel 2

5.2.1. Systembeschreibung

Für das zweite Fallbeispiel wird das Mischwassernetz einer Kleinstadt mit 40.000 Einwohnern verwendet. Das gesamte Entwässerungssystem, aus dem das im Folgenden verwendete operationelle Modell abgeleitet wurde, entwässert eine angeschlossene befestigte Fläche von 279 ha. Insgesamt sind im System 15 Mischwasserentlastungsanlagen mit einem Gesamtspeichervolumen von 12.700 m³ angeordnet. Für die modellprädiktiven Berechnungen wurde das System auf die Bereiche reduziert, die von der Steuerung beeinflusst werden. Darüber hinaus wird ein aggregiertes System verwendet, d.h. die Abbildung des Netzes ist nicht schacht- und haltungsgenau. Vielmehr wurden mehrere Schächte und Haltungen zu einzelnen Objekten zusammengefasst. Einen Überblick über das für die Berechnungen verwendete System gibt Abbildung 5.16.

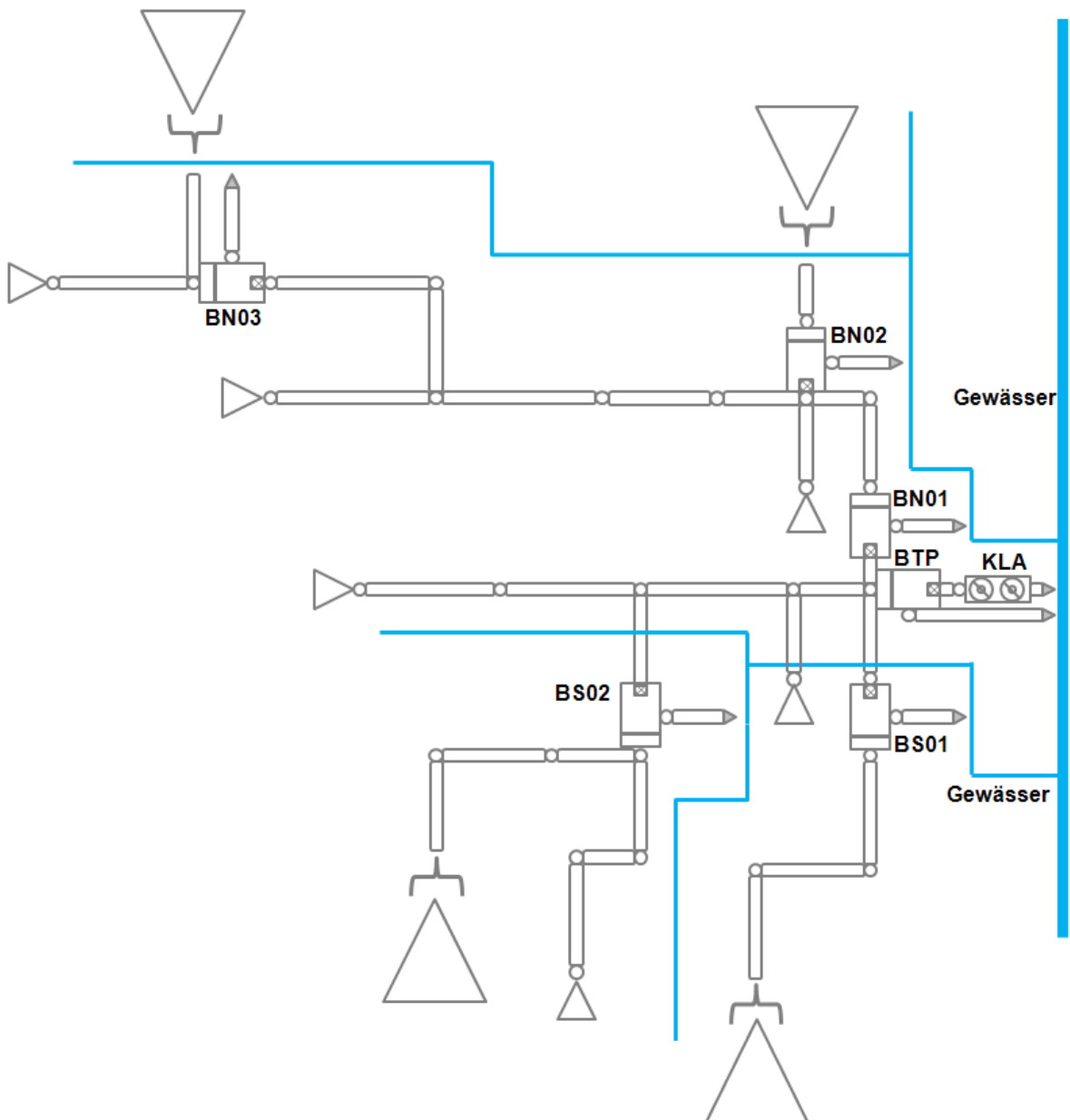


Abbildung 5.16: Fallbeispiel 2 – Systemskizze

Wie in Fallbeispiel 1 wird für die Berechnungen die Minimierung der Entlastungsvolumina als Steuerungsziel definiert. Insgesamt beinhaltet das operative System sechs Entlastungsbauwerke, wobei die Regenüberlaufbecken BN02 und BN03 nicht von der Steuerung beeinflusst werden und somit für gleiche Belastungsfälle auch die gleiche Menge entlasten. Als Steuerorgane wurden die Drosseln der Becken BN01, BS01 und BS02 festgelegt. Der Drosselabfluss des Beckens BKLA, der den Zufluss zur Kläranlage reguliert, ist ebenfalls konstant. Die maximalen Speichervolumina und die Drosselabflüsse der Regenüberlaufbecken sind in Tabelle 5.8 zusammengestellt.

Becken	BS01	BS02	BN01	BN02	BN03	BKLA
Volumen	700 m ³	1.275 m ³	144 m ³	60 m ³	780 m ³	900 m ³
Q_{Dr} (ungesteuert)	60 l/s	80 l/s	750 l/s	410 l/s	100 l/s	250 l/s
$\min Q_{Dr}$	0 l/s	0 l/s	0 l/s	-	-	-
$\max Q_{Dr}$	90 l/s	120 l/s	1.500 l/s	-	-	-

Tabelle 5.8: Fallbeispiel 2 – Kenngrößen der Regenüberlaufbecken

Die Untersuchungen basieren auf einem viertägigen Simulationszeitraum. Als Belastung wird eine fiktive Regenreihe¹² mit einer Gesamtniederschlagshöhe von 18,9 mm verwendet. Bei sämtlichen Berechnungen wird eine einheitliche Überregnung des Gebiets angesetzt. In Abbildung 5.17 sind die Regenreihe sowie eine Zuflussganglinie für ein repräsentatives Teileinzugsgebiet dargestellt.

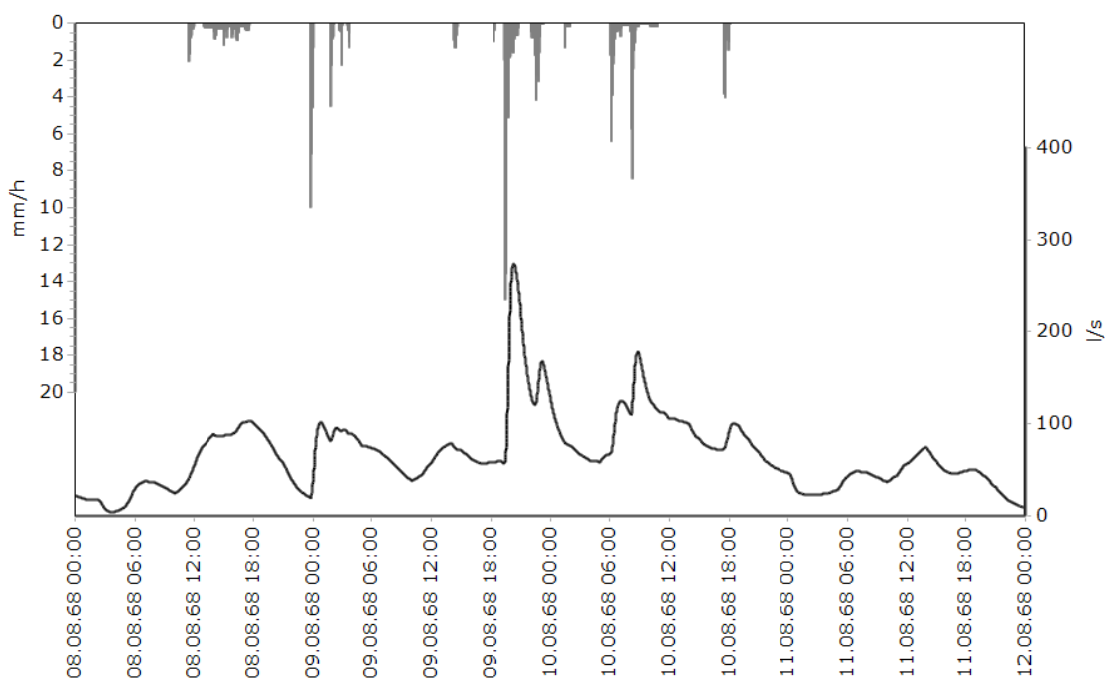


Abbildung 5.17: Fallbeispiel 2 – Regenreihe und repräsentative Zuflussganglinie

Die Entlastungsmengen des ungesteuerten Referenzsystems sind in Tabelle 5.9 zusammengestellt. Insgesamt werden bei der vorgegebenen Belastung 8.837 m³ entlastet. Das meiste Mischwasser (7.314 m³) wird über das Regenüberlaufbecken BKLA unmittelbar vor der Kläranlage abgeschlagen¹³. Die Volumen- und Abflussganglinien der für die Steuerung

¹² Es handelt sich um eine viertägige Periode aus den repräsentativen Niederschlagsdaten für das Schmutzfrachtmodell SMUSI.

¹³ Volumina und Drosselabflüsse der Becken sind nicht optimal eingestellt. Da es sich um Daten eines realen Systems handelt, wurden die Drosselabflüsse des ungesteuerten Systems jedoch nicht optimiert.

relevanten Becken BS01, BS02, BN01 und BKLA sind in Anhang 2 zusammengestellt (Abbildungen A1.1 bis A1.4). An den Ganglinien lässt sich erkennen, dass bei BS02 (Abbildung A1.2) das zur Verfügung stehende Speichervolumen nicht vollständig ausgenutzt wird und bei BN01 (Abbildung A1.3) auf Grund der hohen Weiterleitungsmenge überhaupt kein Volumen aktiviert wird. Das Beckenvolumen von BN01 ist zwar nur klein, durch den Rückstau in die oberhalb liegenden Kanäle wird aber ein zusätzliches Volumen von etwa 500 m³ aktiviert.

<i>Ungesteuertes System</i>	
<i>BS01</i>	956 m ³
<i>BS02</i>	155 m ³
<i>BN01</i>	0 m ³
<i>BN02</i>	0 m ³
<i>BN03</i>	412 m ³
<i>BKLA</i>	7.314 m ³
<i>Gesamt</i>	8.837 m ³

Tabelle 5.9: Fallbeispiel 2 – Entlastungsvolumina des ungesteuerten Systems

5.2.2. Vergleich der Optimierungsverfahren

Für die Berechnungen wird von idealen Systemzuständen, d.h. von perfekten Zuflussprognosen, ausgegangen. Für Evaluierungs- und Vorhersagehorizont werden zunächst jeweils nur zwei Stunden angesetzt. Als Kontrollhorizont wird eine Stunde, für den Steuerungszeitschritt zehn Minuten verwendet. Die Zeithorizonte sind in Abbildung 5.18 noch einmal grafisch dargestellt. Da für drei Drosselorgane Steuerungsentscheidungen ermittelt werden müssen, besteht das Optimierungsproblem in jedem Steuerungszeitschritt aus 15 Optimierungsparametern.

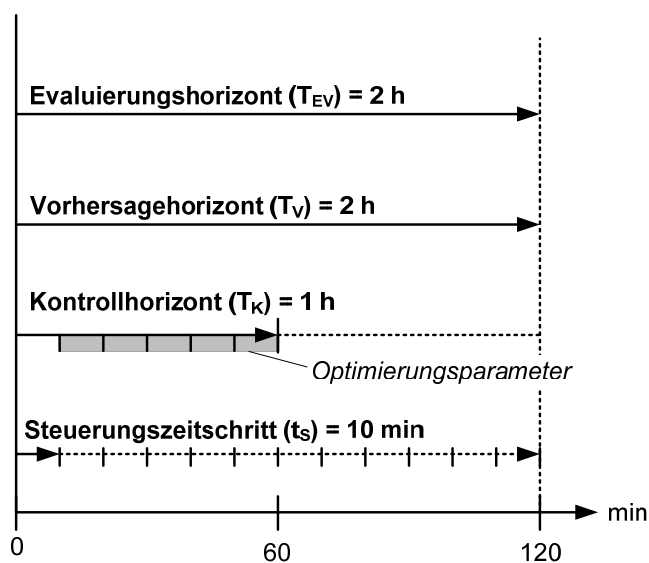


Abbildung 5.18: Fallbeispiel 2 – Grafische Darstellung der Zeithorizonte, Evaluierungshorizont = 2 h

Die Steuerungsergebnisse für beide Optimierungsverfahren sind in Tabelle 5.10 zusammengestellt. Hieraus lässt sich entnehmen, dass die Steuerung mit dem Verfahren von Hooke & Jeeves zu einer wesentlich deutlicheren Reduktion der Entlastungsvolumina im Vergleich mit den Evolutionsstrategien führen (7.779 m³ gegenüber 8.635 m³). Durch die Steuerung der Evolutionsstrategien ist die Reduktion generell nur gering (8.635 m³ gegenüber 8.837 m³ im ungesteuerten Fall). In diesem Fall wurde nur eine Simulation mit den Evolutionsstrategien durchgeführt, wobei mit zehn Generationen und zehn Nachkommen gerechnet wurde (insgesamt also 100 Zielfunktionsauswertungen pro Steuerungszeitschritt). Da es sich um ein stochastisches Verfahren handelt, ist nach den Erfahrungen aus den übrigen durchgeführten Berechnungen zu erwarten, dass in weiteren Rechenläufen bessere Steuerungsergebnisse ermittelt werden, vor allem dann, wenn die Anzahl der Zielfunktionsauswertungen erhöht wird. Das Beispiel dokumentiert somit ein grundsätzliches Problem von globalen Optimierungsalgorithmen mit stochastischen Eigenschaften: die Verfahren sind zwar prinzipiell in der Lage, globale Optima zu finden, können aber, vor allem bei einer zu geringen Zahl an Zielfunktionsauswertungen, nur suboptimale Ergebnisse liefern.

	<i>Referenzsystem</i>	<i>H&J</i> (2 h)	<i>PES</i> (2 h)
<i>BS01</i>	956 m ³	2.379 m ³	708 m ³
<i>BS02</i>	155 m ³	92 m ³	556 m ³
<i>BN01</i>	0 m ³	0 m ²	5.895 m ³
<i>BN02</i>	0 m ³	0 m ³	0 m ³
<i>BN03</i>	412 m ³	412 m ³	412 m ³
<i>BKLA</i>	7.314 m ³	4.896 m ³	1.064 m ³
<i>Gesamt</i>	8.837 m ³	7.779 m ³	8.635 m ³

Tabelle 5.10: Fallbeispiel 2 – Vergleich der Entlastungsvolumina zwischen ungesteuertem und gesteuertem System, Evaluierungshorizont = 2 h

Volumen- und Abflussganglinien für die beiden Simulationen sind in Anhang 2 (Abbildungen A1.5 bis A1.12) zusammengestellt. Beide Optimierungsverfahren aktivieren das zur Verfügung stehende Speichervolumen von BS02 (Abbildung A1.6 und Abbildung A1.10). Die Evolutionsstrategien aktivieren darüber hinaus noch das Speichervolumen von BN01 (Abbildung A1.11), wodurch die Entlastungsmengen bei BKLA zwar deutlich reduziert werden können (1.064 m³ gegenüber 4.896 m³ bei der Steuerung mit Hooke & Jeeves), aber dafür große Entlastungsmengen bei BN01 hervorruft (5.895 m³). Insgesamt ist somit das Ergebnis der Evolutionsstrategien schlechter.

5.2.3. Variation des Evaluierungshorizonts

In den folgenden Simulationen wird der Evaluierungshorizont auf fünf Stunden erhöht, während für den Vorhersagehorizont weiter zwei Stunden angesetzt werden. Für die Zeitspanne zwischen Evaluierungs- und Vorhersagehorizont wird der Zufluss zum Kanalnetz zu Null gewählt. Für den Kontrollhorizont wird wieder eine Stunde und für den Steuerungszeitschritt zehn Minuten angesetzt (siehe Abbildung 5.19).

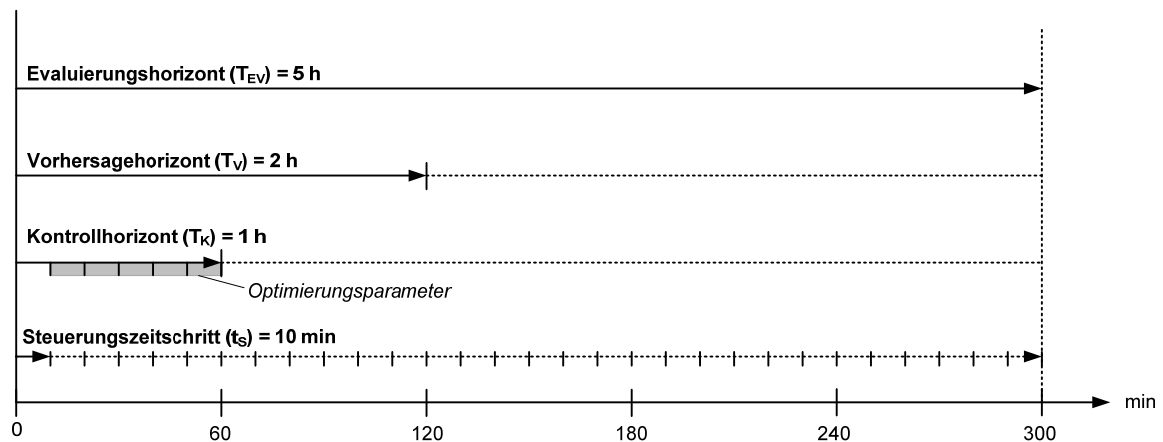


Abbildung 5.19: Fallbeispiel 2 – Grafische Darstellung der Zeithorizonte, Evaluierungshorizont = 5 h

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Tabelle 5.11, die dazugehörigen Ganglinien in Anhang A.2 in den Abbildungen A1.13 bis A1.20 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die Steuerung mit dem Verfahren von Hooke & Jeeves und dem fünfstündigen Vorhersagehorizont nur eine geringe Verbesserung gegenüber dem kürzeren Vorhersagehorizont hervorruft (7.768 m^3 gegenüber 7.779 m^3). Demgegenüber führt die Steuerung der Evolutionsstrategien mit dem längeren Vorhersagehorizont zu einer deutlichen Reduzierung der Entlastungsvolumina (6.499 m^3 gegenüber 8.635 m^3), obwohl die gleiche Anzahl an Generationen und Nachkommen angesetzt wurde. Entscheidend für die geringeren Entlastungsmengen ist wiederum das Beckenvolumen von BN01, das von den Evolutionsstrategien aktiviert wird, vom Verfahren von Hooke & Jeeves aber nicht. Gegenüber dem kürzeren Evaluierungshorizont ist der Algorithmus aber offenbar in der Lage, die Drosselabflüsse der übrigen Becken so abzustimmen, dass insgesamt deutlich weniger entlastet wird.

	Referenzsystem	H&J (2 h)	PES (2 h)	H&J (5 h)	PES (5 h)
BS01	956 m ³	2.379 m ³	708 m ³	1.490 m ³	1.045 m ³
BS02	155 m ³	92 m ³	556 m ³	541 m ³	684 m ³
BN01	0 m ³	0 m ²	5.895 m ³	0 m ³	1.500 m ³
BN02	0 m ³	0 m ³	0 m ³	0 m ³	0 m ³
BN03	412 m ³	412 m ³	412 m ³	412 m ³	412 m ³
BKLA	7.314 m ³	4.896 m ³	1.064 m ³	5.325 m ³	2.858 m ³
Gesamt	8.837 m ³	7.779 m ³	8.635 m ³	7.768 m ³	6.499 m ³

Tabelle 5.11: Fallbeispiel 2 – Vergleich der Entlastungsvolumina zwischen ungesteuertem und gesteuertem System, Evaluierungshorizont = 5 h

5.3. Fallbeispiel 3

Das dritte Fallbeispiel besitzt, gemessen an der Zahl der hydraulischen Elemente, eine ähnliche Komplexität wie das zweite Fallbeispiel. Für die Erstellung wurde das System des zweiten Fallbeispiels so modifiziert, dass ein für Steuerungen prädestiniertes Entwässerungsnetz entsteht: Zwei flache Transportsammler führen parallel zur Kläranlage und der größte Teil der Entwässerungsflächen ist über (steuerbare) Regenüberlaufbecken an diese Transportsammler angeschlossen.

5.3.1. Systembeschreibung

Die Kenngrößen des Einzugsgebietes entsprechen denen des zweiten Fallbeispiels, d.h. das System entwässert insgesamt eine befestigte Fläche von 279 ha. Das operationelle System für die Steuerung (siehe Abbildung 5.20) beinhaltet zudem die gleichen sechs Mischwasserentlastungsanlagen. Da allerdings das aktivierbare Stauvolumen in den Transportsammlern in den Mittelpunkt gestellt werden soll, wurden im Vergleich zum zweiten Fallbeispiel kleinere Beckenvolumina und flachere Haltungsneigungen für die Sammler angesetzt. Für das ungesteuerte System wurden zunächst Optimierungsrechnungen durchgeführt, in denen die optimalen Drosselabflüsse ermittelt wurden. Da das Becken BN01 nicht gesteuert werden soll, wurde der Drosselabfluss ausreichend groß angesetzt, damit an dieser Stelle nicht entlastet wird. Die Kenngrößen der sechs Becken sind in Tabelle 5.12 zusammengestellt.

Als Belastung wurden die Niederschlagsreihen aus Fallbeispiel 1 verwendet, wobei eine Regenreihe als Belastung für die nördlichen und die andere als Belastung für die südlichen Teileinzugsgebiete angesetzt wird.

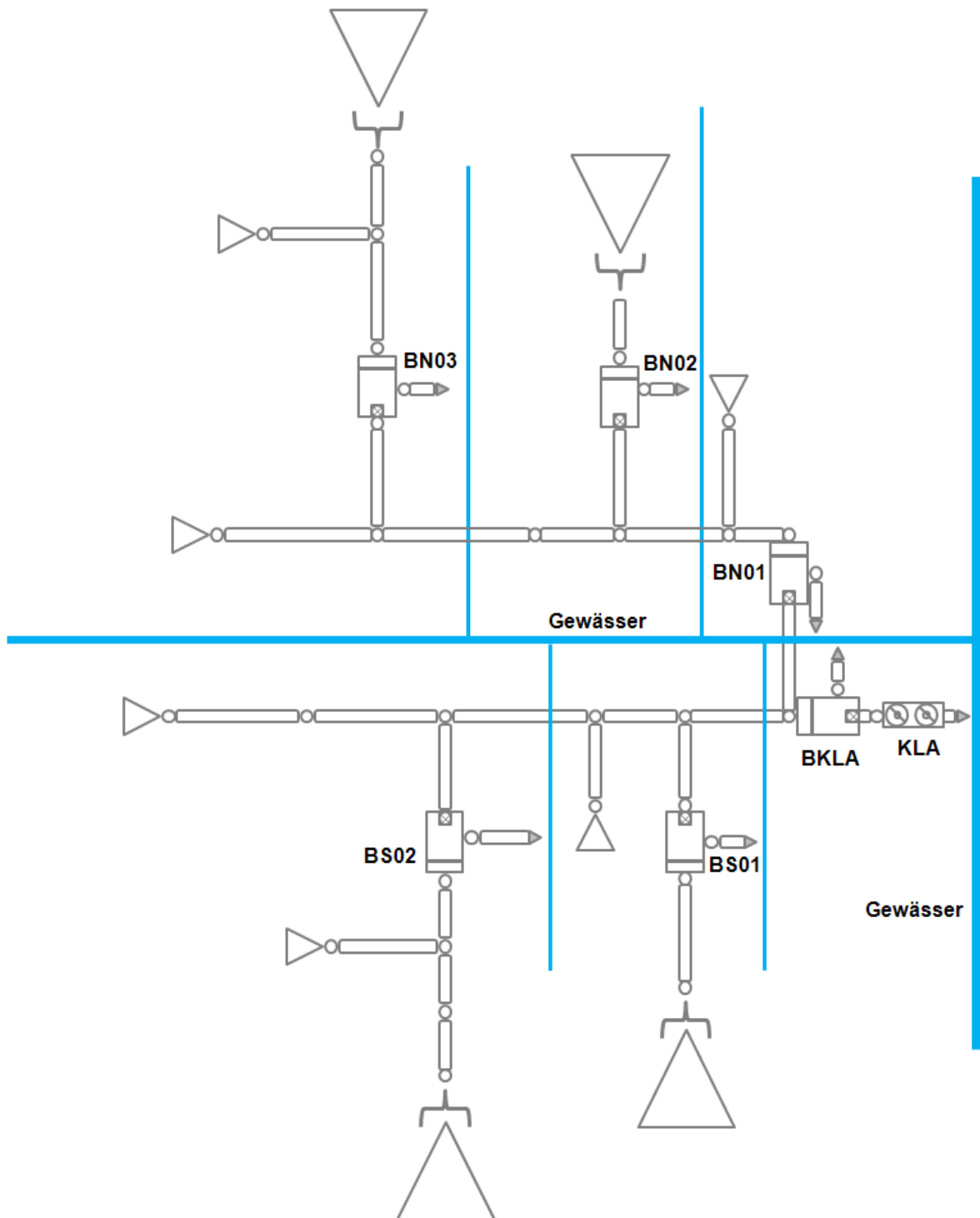


Abbildung 5.20: Fallbeispiel 3 – Systemskizze

Becken	BS01	BS02	BN01	BN02	BN03	BKLA
Volumen	135 m ³	430 m ³	50 m ³	15 m ³	180 m ³	40 m ³
(aktivierbar)	(30 m ³)	(80 m ³)	(750 m ³)	(150 m ³)	(275 m ³)	(1.100 m ³)
Q_{Dr} (ungesteuert)	35 l/s	75 l/s	145 l/s	250 l/s	90 l/s	250 l/s
min Q_{Dr}	0 l/s	0 l/s	0 l/s	-	0 l/s	-
max Q_{Dr}	70 l/s	150 l/s	290 l/s	-	180 l/s	-

Tabelle 5.12: Fallbeispiel 3 – Kenngrößen der Regenüberlaufbecken

Die Entlastungsmengen für das ungesteuerte Referenzsystem sind in Tabelle 5.13, die entsprechenden Ganglinien in Anhang A.3 in den Abbildungen A2.1 bis A2.5 zusammengestellt.

Ungesteuertes System	
BS01	2.046 m ³
BS02	1.366 m ³
BN01	1.451 m ³
BN02	0 m ³
BN03	4.339 m ³
BKLA	256 m ³
Gesamt	9.458 m ³

Tabelle 5.13: Fallbeispiel 3 – Entlastungsvolumina des ungesteuerten Systems

5.3.2. Vergleich einfacher Berechnungsansätze für die Prozessmodellierung

Das System wurde für die Untersuchungen so modifiziert, dass die Transportsammler vor den Entlastungsbauwerken weiträumig eingestaut und somit als aktivierbarer Speicher-raum genutzt werden, wodurch ein signifikanter Rückstauereffekt hervorgerufen wird. Soll das System – speziell die Beckenkennlinie – unverändert für die Modellierung verwendet werden, ist eine realitätsnahe Berechnung nur einem hydrodynamischen Kanalnetzmodell möglich. Der Umstand wird durch die Längsschnitte in Abbildung 5.21 und Abbildung 5.22 dokumentiert. Dargestellt ist der Längsschnitt des südlichen Transportsammlers zum Becken BKLA, der bei entsprechenden Abflussverhältnissen durch eine hochgezogene Schwelle auf einer Länge von etwa 750 m eingestaut wird. Da beim Ansatz der kinematischen Welle (siehe Gl. 2.4) sowohl die Beschleunigungsterme als auch der Druckterm der Bewegungsgleichung vernachlässigt werden, basiert die Abflussberechnung auf der Annahme „Normalabfluss“; das Wasserspiegelgefälle entspricht dem Hangungsgefälle. Unter dieser Annahme wird kein Rückstauvolumen aktiviert (siehe Abbildung 5.22).

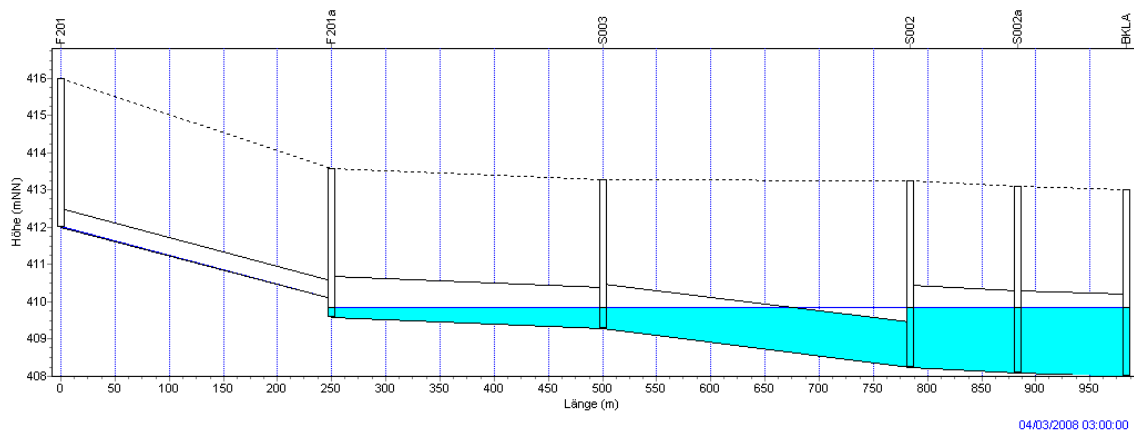


Abbildung 5.21: Fallbeispiel 3 – Längsschnitt des Zulaufkanals zu BKLA unter Ansatz der dynamischen Wellenberechnung

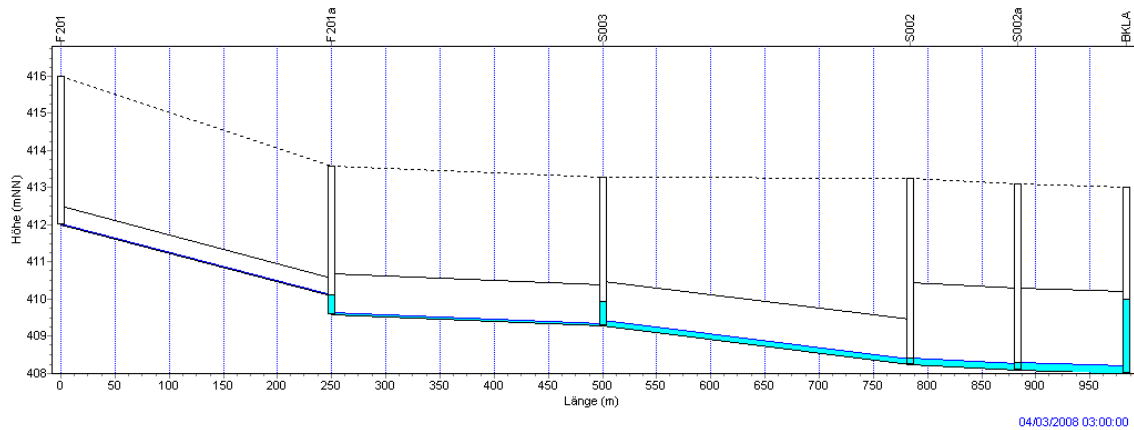


Abbildung 5.22: Fallbeispiel 3 – Längsschnitt des Zulaufkanals zu BN01 unter Ansatz der kinematischen Wellenberechnung

Die Folge des nicht berücksichtigten Volumens sind deutlich größere Entlastungsmengen. In Tabelle 5.14 sind die Entlastungsvolumina für beide Berechnungen angegeben, in Abbildung 5.23 sind exemplarisch die dazugehörigen Entlastungsabflüsse am Becken BKLA dargestellt. Die Entlastungsmengen steigen bei der kinematischen Welle um fast 40 %. Die Werte würden sich durch zusätzliche Beckenvolumina deutlich verringern. Die Ermittlung der zu modifizierenden Beckenkennlinien ist allerdings aufwändig. Zudem verbessert die Erhöhung der Beckenvolumina die Ergebnisse vor allem hinsichtlich der Volumenbilanz. Die Abflussspitzen können damit nicht gleichwertig abgebildet werden.

	<i>Ungesteuertes System (dynamische Welle)</i>	<i>Ungesteuertes System (kinematische Welle)</i>
<i>BS01</i>	2.046 m ³	2.224 m ³
<i>BS02</i>	1.366 m ³	1.812 m ³
<i>BN01</i>	1.451 m ³	3.019 m ³
<i>BN02</i>	0 m ³	0 m ³
<i>BN03</i>	4.339 m ³	4.858 m ³
<i>BKLA</i>	256 m ³	1.271 m ³
<i>Gesamt</i>	9.458 m ³	13.184 m ³

Tabelle 5.14: Fallbeispiel 3 – Vergleich der Entlastungsabflüsse des ungesteuerten Systems unter Ansatz von dynamischer und kinematischer Welle

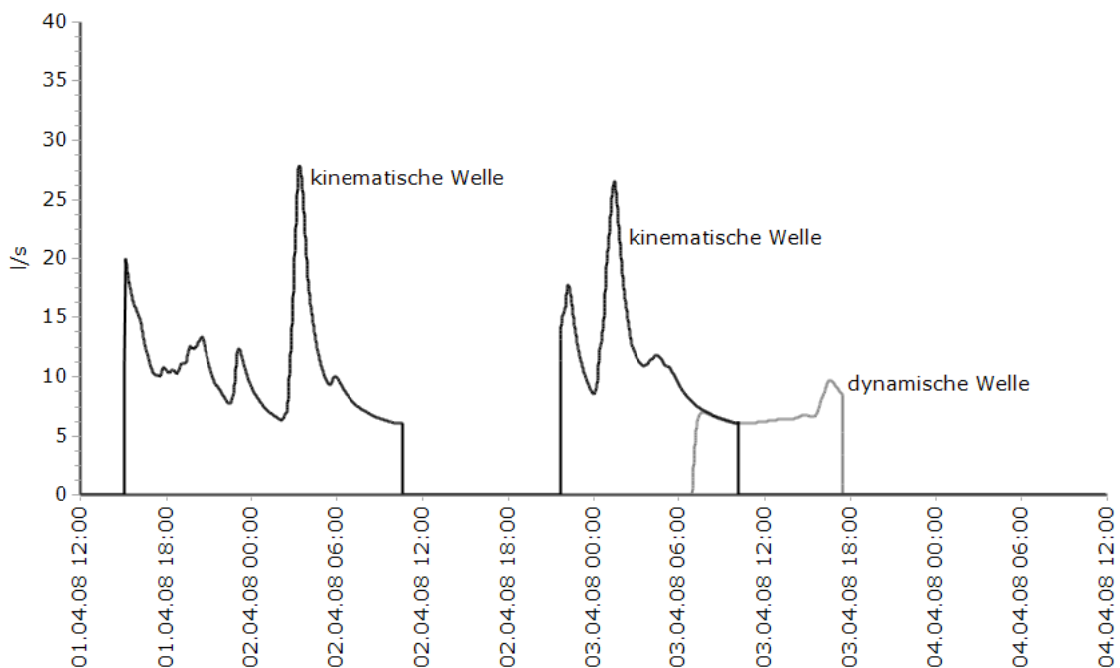


Abbildung 5.23: Fallbeispiel 3 – Vergleich der Entlastungsabflüsse bei BKLA zwischen dynamischer und kinematischer Welle

Der vollständige Beweis, dass unter Ansatz von einfacheren Ansätzen für die hydraulische Prozessmodellierung (wie z.B. dem kinematischen Wellenansatz) nur suboptimale Entscheidungen gefunden werden, ist damit zwar nicht geführt, zumal bei der Anwendung des Prinzips des rollenden Horizonts die Anfangsbedingungen für die Optimierungsrechnungen in jedem Steuerungszeitschritt wieder aktualisiert werden. Gerade die Ganglinien in Abbildung 5.23 verdeutlichen aber, dass es zu signifikanten Fehleinschätzungen hinsichtlich der Abflüsse und damit letztlich der Steuerungsziele kommen kann: Beide Simulationsläufe beginnen am 1.4. um 12:00 mit den gleichen Anfangsbedingungen. Wird im vorliegenden Fall ein Evaluierungshorizont von mehr als drei Stunden angesetzt, dann wird bei der Berechnung mit dem kinematischen Wellenansatz bereits im ersten

Steuerungszeitschritt eine Entlastung registriert, während bei der Simulation mit dem hydrodynamischen Modell keine Entlastung berechnet wird.

Die Führung des vollständigen Beweises (d.h. die Verwendung von vereinfachten Berechnungsansätzen für die Ermittlung der Steuerungsentscheidungen) ist auf der Basis von Simulationsstudien nicht ohne weiteres möglich, da die Simulation der Anfangsbedingungen für den nächsten Zeitschritt (linker Block in Abbildung 4.3) in jedem Fall mit einem hydrodynamischem Ansatz erfolgen muss. Da das Ergebnis dieses einen Zeitschrittes als Anfangsbedingung für den nächsten Optimierungslauf verwendet wird, kommt es zu einem nicht mehr tolerierbaren Bilanzfehler, wenn für die Optimierung wiederum ein Verfahren eingesetzt wird, bei dem Normalabflussbedingungen vorausgesetzt werden.

5.3.3. Vergleich der Optimierungsverfahren

Für die Berechnungen wird im Gegensatz zu den ersten beiden Fallbeispielen ein Steuerungszeitschritt von 5 Minuten angesetzt. Der Kontrollhorizont wird auf 30 Minuten reduziert (siehe Abbildung 5.24). Vier Becken (BS01, BS02, BN01 und BN03) können gesteuert werden, so dass sich in jedem Steuerungszeitschritt ein Optimierungsproblem mit 20 Optimierungsvariablen ergibt.

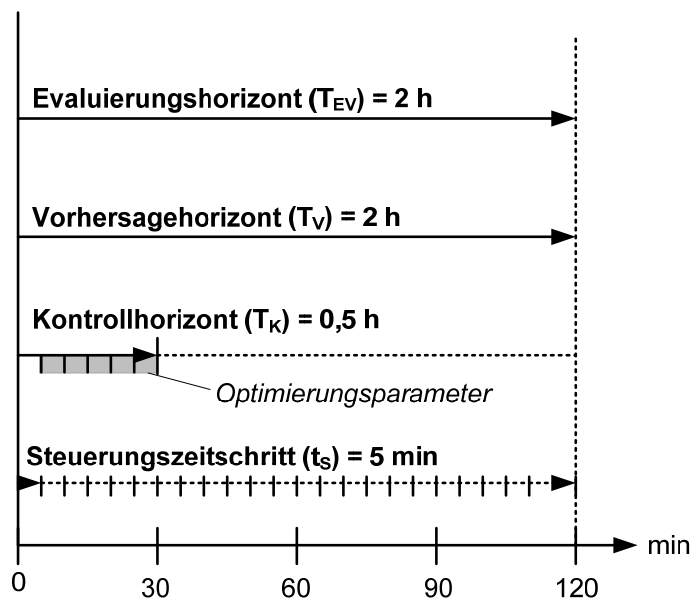


Abbildung 5.24: Fallbeispiel 3 – Grafische Darstellung der Zeithorizonte

Die Entlastungsmengen für die Berechnungen mit BlueM.MPC sind in Tabelle 5.15 aufgeführt. Die dazugehörigen Ganglinien können in Anhang A.3 den Abbildungen A2.6 bis A2.15 entnommen werden. Bei den Evolutionsstrategien wurde mit 25 Generationen und 10 Nachkommen gerechnet, so dass sich insgesamt 250 Zielfunktionsauswertungen für jeden Steuerungszeitschritt ergeben. Die Berechnungen zeigen erneut, dass beide Optimierungsverfahren in der Lage sind, geringere Entlastungsmengen gegenüber dem

Referenzsystem zu berechnen, auch wenn die Reduzierung der Entlastungsmengen gegenüber Fallbeispiel 2 geringer ist. Die Steuerungsqualität bei der PES-Simulation ist etwas schlechter als die mit Hooke & Jeeves (9.077 m³ gegenüber 8.901 m³).

	<i>Referenzsystem</i>	<i>H&J</i>	<i>PES</i>
<i>BS01</i>	2.046 m ³	24 m ³	1.817 m ³
<i>BS02</i>	1.366 m ³	176 m ³	978 m ³
<i>BN01</i>	1.451 m ³	1.779 m ³	2.285 m ³
<i>BN02</i>	0 m ³	0 m ³	0 m ³
<i>BN03</i>	4.339 m ³	549 m ³	2.146 m ³
<i>BKLA</i>	256 m ³	6.373 m ³	1.851 m ³
<i>Gesamt</i>	9.458 m ³	8.901 m ³	9.077 m ³

Tabelle 5.15: Fallbeispiel 3 – Vergleich der Entlastungsabflüsse zwischen ungesteuertem und gesteuertem System

6. Ergebnisdiskussion

In Kapitel 5 wurden drei Fallbeispiele mit unterschiedlichen Komplexitäten und Netzcharakteristiken untersucht. Im Folgenden werden diese Ergebnisse noch einmal kurz zusammengefasst und anschließend vor dem Hintergrund des in Kapitel 2.5 formulierten Forschungsbedarfs analysiert.

6.1. Steuerungsqualität

Der Erfolg einer Steuerung wird an Hand der vorab definierten Steuerungsziele quantifiziert. BlueM.MPC ermöglicht grundsätzlich abfluss- und schmutzfrachtbasierte Steuerungsziele. In den untersuchten drei Fallbeispielen wurden in allen Fällen abflussbasierte Ziele verfolgt. Im ersten Fallbeispiel wurden zusätzlich schmutzfrachtbasierte Ziele analysiert. Bei sämtlichen Szenarien wurden die BlueM.MPC-Berechnungen parallel mit dem Verfahren von Hooke & Jeeves sowie den Evolutionsstrategien durchgeführt. Berechnungsergebnisse für die Software Lamatto liegen nur für abflussbasierte Steuerungen des ersten Fallbeispiels vor. Die wesentlichen Ergebnisse der BlueM.MPC-Berechnungen sind für alle drei Fallbeispiele noch einmal in Tabelle 6.1 zusammengestellt.

	Referenzsystem	Hooke & Jeeves	Evolutionsstrategien
Fallbeispiel 1			
Abflussbasiert	1.358 m ³ 223,4 kg	842 m ³ 88,5 kg (-38 %) (-60 %)	843 m ³ 85,8 kg (-38 %) (-62 %)
Schmutzfrachtbasiert (ohne Retention)	1.358 m ³ 223,4 kg	839 m ³ 81,8 kg (-38 %) (-63 %)	844 m ³ 83,2 kg (-38 %) (-63 %)
Schmutzfrachtbasiert (mit Retention)	1.358 m ³ 5,8 kg	1.067 m ³ 0,1 kg (-21 %) (-89 %)	887 m ³ 0,0 kg (-35 %) (-100 %)
Fallbeispiel 2			
Abflussbasiert (EH: 2h)	8.837 m ³	7.779 m ³ (-12 %)	8.635 m ³ (-2 %)
Abflussbasiert (EH: 5 h)	8.837 m ³	7.768 m ³ (-12 %)	6.499 m ³ (-26 %)
Fallbeispiel 3			
Abflussbasiert	9.458 m ³	8.901 m ³ (-6 %)	9.077 m ³ (-4 %)

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der mit BlueM.MPC berechneten Entlastungsvolumina und -frachten für alle drei Fallbeispiele

Fallbeispiel 1 diente vor allem zum Testen der entwickelten Software. Es handelt sich daher um ein einfaches System. Beide Teileinzugsgebiete wurden mit unterschiedlichen

Niederschlägen und Schmutzstoffeinträgen belastet. Die daraus resultierenden Steuer-bzw. Optimierungsprobleme sind aber offenbar dennoch vergleichsweise einfach, da mit beiden Optimierungsalgorithmen fast die gleichen Entlastungsvolumina und -frachten berechnet werden. Auch durch das indirekte Optimierungsverfahren in Lamatto wurde eine Verminderung der Entlastungsvolumina um 35 % berechnet. Das Ergebnis liegt somit in der gleichen Größenordnung.

In Fallbeispiel 2 wurden abflussbasierte Steuerungen mit unterschiedlichen Evaluierungshorizonten durchgeführt. Das Verfahren von Hooke & Jeeves liefert in diesem Fall unabhängig von der Länge des Evaluierungshorizonts konstante Ergebnisse. Der Unterschied zwischen den Entlastungsvolumina ist mit 7.779 m^3 gegenüber 7.768 m^3 sehr gering. Bei den Evolutionsstrategien fallen die Ergebnisse differenzierter aus. Bei Verwendung des kurzen Evaluierungshorizonts sind die Entlastungsvolumina deutlich höher als die von Hooke & Jeeves (8.635 m^3 gegenüber 7.779 m^3). Im Falle des langen Evaluierungshorizonts sind sie allerdings mit 6.499 m^3 deutlich geringer. Begründen lässt sich dies mit der geringen Anzahl an Zielfunktionsauswertungen (jeweils zehn Generationen und Nachkommen) bei den Berechnungen. Durch die Vorgaben des Kontrollhorizonts und des Steuerungszeitschritts (eine Stunde und zehn Minuten) ergeben sich bei drei Steuerorganen insgesamt 15 Optimierungsvariablen, für die 100 Zielfunktionsauswertungen offenbar nicht zum Finden der optimalen Lösung ausreichen. Die Ergebnisse dokumentieren somit die stochastischen Eigenschaften der Evolutionsstrategien. Das Verfahren ist einerseits in der Lage ist, sehr gute Lösungen zu finden. Bei einer zu geringen Anzahl an Zielfunktionsauswertungen kann es jedoch auch deutlich schlechtere Steuerungsergebnisse berechnen.

In Fallbeispiel 3 wurde ein flaches Kanalnetz mit einem hohen aktivierbaren Speichervolumen in den Transportsammlern aufgebaut. Der Steuerungszeitschritt wurde auf fünf Minuten reduziert, um möglichst realitätsnahe Bedingungen hinsichtlich der verfügbaren Rechenzeiten zu generieren. Wie im zweiten Fallbeispiel wurde ein operationelles Modell verwendet, bei dem mehrere hydraulische Elemente zu einem Grobnetz aggregiert wurden. Die Berechnungen ergeben mit beiden Optimierungsverfahren nur eine geringe Verminderung der Entlastungsvolumina (6 % mit Hooke & Jeeves und 4 % mit den Evolutionsstrategien). Es lässt sich jedoch nicht ermitteln, ob es sich bereits annähernd um die global beste Lösung handelt. Dieses Problem existiert allerdings immer bei der nicht-linearen Parameteroptimierung.

6.2. Rechenzeit

Im Folgenden wird an Hand der Rechenzeiten von BlueM.MPC und Lamatto abgeschätzt, unter welchen Bedingungen der Einsatz von hydrodynamischen Modellen für die modellprädiktive Steuerung realistisch ist. Die genannten Rechenzeiten wurden auf einem herkömmlichen Computer mit einem Einkernprozessor und einer Taktung von 3,0 GHz ermittelt. Es sei an diese Stelle betont, dass die Rechenzeiten lediglich mit einfachen Mitteln erfasst wurden, d.h. sie wurden mit einer Genauigkeit von einer Sekunde in eine Logdatei geschrieben. Eine detaillierte Untersuchung von aktuell zur Verfügung stehenden

Rechenkapazitäten herkömmlicher Computer und der diesbezüglichen prognostizierten Entwicklung wurde nicht durchgeführt.

Bei der in BlueM.MPC verwendeten direkten Optimierung muss, unabhängig von dem verwendeten Optimierungsverfahren, für jeden Suchschritt des Optimierungsprozesses eine Auswertung der Zielfunktion, d.h. eine Simulation mit dem hydrodynamischen Modell, durchgeführt werden. Das Finden einer hinreichend guten („optimalen“) Steuerungsent-scheidung erfordert eine Mindestanzahl an Zielfunktionsauswertungen. Diese Anzahl ist problemabhängig. Entscheidende Faktoren sind die Zahl der Optimierungsvariablen, also der Steuerungsorgane und der Länge sowie der Diskretisierung des Kontrollzeitschritts, sowie die Form des Lösungsraums, der sich im Falle der modellprädiktiven Steuerung in Abhängigkeit von den Zuflussverhältnissen ständig verändert.

Die Konvergenzgeschwindigkeit ist bei den verwendeten Optimierungsverfahren unterschiedlich. Beim Verfahren von Hooke & Jeeves verringert sich die Konvergenzgeschwindigkeit in der Tastschrittschleife linear mit der Anzahl der Optimierungsparameter. Bei den Evolutionsstrategien kann kein funktionaler Zusammenhang zwischen der Anzahl der Optimierungsvariablen und den erforderlichen Simulationen formuliert werden. Das Verfahren ist aber wegen seiner stochastischen Vorgehensweise generell besser für Probleme mit vielen Optimierungsvariablen geeignet.

Die Software Lamatto ermittelt die Steuerungsentscheidungen durch indirekte Optimierung. Für die Entscheidungsfindung sind daher deutlich weniger Simulationen mit dem Prozessmodell erforderlich, die Anzahl der Optimierungsparameter spielt nur eine untergeordnete Rolle. Der Vergleich der Rechengeschwindigkeiten für die ungesteuerten Systeme zwischen den Prozessmodellen SWMM5 und Lamatto ergab nur geringe Unterschiede. Trotz unterschiedlicher numerischer Lösungsverfahren liegen die Rechenzeiten der Prozessmodelle in der gleichen Größenordnung.

In Fallbeispiel 1 beträgt der Steuerungszeitschritt zehn Minuten und der Kontrollhorizont wurde mit einer Stunde angesetzt. Gesteuert wird lediglich der Drosselabfluss des Becken B01, so dass in jedem Steuerungszeitschritt ein Optimierungsproblem mit fünf Optimierungsvariablen gelöst werden muss. Für den Evaluierungshorizont wurden vier Stunden angesetzt. Für die Zielfunktionsauswertung muss somit jeweils eine Simulation des aus nur wenigen hydraulischen Elementen bestehenden Systems mit einem Simulationszeitraum von vier Stunden durchgeführt werden. Eine solche Simulation dauert mit SWMM5 und Lamatto weniger als eine Sekunde, so dass (unter Vernachlässigung der erforderlichen Zeit für den Datentransfer) insgesamt 600 Simulationen innerhalb des Steuerungszeitschritts durchgeführt könnten.

Die Lösung dieses Problems ist für beide Simulationsmodelle (BlueM.MPC und Lamatto) problemlos möglich. Die tatsächlich benötigten Rechenzeiten sind als Ganglinien in Abbildung 6.1 dargestellt. Jeder Ganglinienwert stellt die erforderliche Rechendauer in Sekunden für das Finden der optimalen Lösung im aktuellen Steuerungszeitschritt dar. In drei Perioden (am 1.4. zwischen 13:00 und 14:00, am 2.4. zwischen 06:00 und 22:00 sowie ab 3.4. 6:00) sinkt die Rechenzeit für beide in BlueM.MPC verwendeten Optimierungsverfahren. Dies liegt daran, dass zu diesen Zeitpunkten die Zielfunktionswerte durch nicht vorhandene Entlastungsabflüsse und durch eine geringe Beckenfüllung bei B01 nur

knapp über null liegen. BlueM.MPC überprüft generell nach der ersten Simulation eines Steuerungszeitschrittes den Zielfunktionswert und verzichtet bei Unterschreiten eines vorzugebenden Schwellwertes auf eine weitere Optimierung.

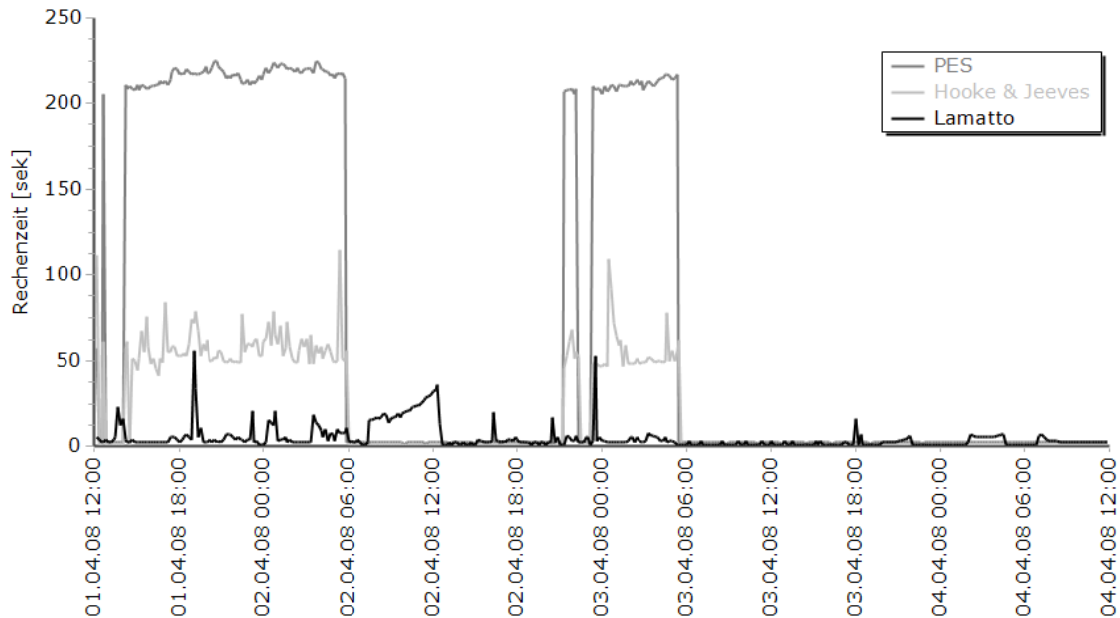


Abbildung 6.1: Rechenzeiten für Fallbeispiel 1

Aus den Ganglinien geht hervor, dass die Rechenzeiten von Lamatto deutlich kürzer sind als die von BlueM.MPC. Lamatto benötigt in der Regel weniger als 25 Sekunden für die Entscheidungsfindung, das Verfahren von Hooke & Jeeves 50 bis 75 Sekunden. Damit bestätigt sich, dass indirekte Optimierungsmethoden effektiv sind, wenn die Ableitungen analytisch berechnet werden können. Bei den Evolutionsstrategien wird die Rechenzeit durch die Anzahl der Generationen und Nachkommen vom Benutzer bestimmt und damit von Benutzer vorgegeben. Im vorliegenden Fall wurden 25 Generationen und 10 Nachkommen angesetzt, so dass 250 Simulationen durchgeführt werden. Die Rechenzeit ist daher relativ konstant und liegt zwischen 210 und 230 Sekunden. Die Unterschiede sind durch andere im Hintergrund ablaufende Prozesse bedingt, die die Leistungsfähigkeit des PCs beeinträchtigen. Die Option zur Parallelisierung, die in BlueM.MPC für die Evolutionsstrategien bei der Verwendung von Mehrkernprozessoren zur Verfügung steht, wurde bei diesen Berechnungen nicht verwendet.

Der Vergleich verdeutlicht einen Vorteil der Evolutionsstrategien für den Einsatz in der modellprädiktiven Steuerung. Die Anzahl der Zielfunktionsauswertungen kann vorab festgelegt und somit auf den aktuellen Steuerungszeitschritt angepasst werden. Die beste Lösung wird generell abgespeichert, so dass diese am Ende immer zur Verfügung steht. Im vorliegenden Fall lässt sich vermuten, dass die Anzahl der Generationen bzw. Nachkommen auch kleiner gewählt hätte werden können.

In Fallbeispiel 2 wurde ebenfalls mit einem Kontrollhorizont von einer Stunde und einem Steuerungszeitschritt von zehn Minuten gerechnet. Gesteuert werden die Drosselabgaben von drei Becken, so dass sich in jedem Steuerungszeitschritt ein Problem mit 15 Optimierungsvariablen ergibt. In der ersten Berechnung wurde ein Evaluierungshorizont von zwei, in der zweiten Berechnung von fünf Stunden angesetzt. Das hydraulische Modell ist komplexer als das des ersten Fallbeispiels. Eine Simulation mit einem Simulationszeitraum von zwei Stunden dauert etwas mehr als eine Sekunde, mit einem Evaluierungshorizont von fünf Stunden zwischen zwei und drei Sekunden.

Die Ganglinien mit den Rechenzeiten für beide Evaluierungshorizonte sind in Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 dargestellt. Sie zeigen, dass das Verfahren von Hooke & Jeeves Probleme hat, Lösungen innerhalb des Steuerungszeitschritts zu ermitteln. Bei dem Evaluierungshorizont von zwei Stunden wird er nur einige Male überschritten, bei fünf Stunden aber bei sämtlichen Perioden, in denen Optimierungsrechnungen erforderlich sind. Die Evolutionsstrategien benötigen auf Grund der vorgegebenen Anzahl an Zielfunktionsauswertungen deutlich weniger Zeit als zehn Minuten. Dafür muss aber zumindest im ersten Fall in Kauf genommen werden, dass das Ergebnis qualitativ schlechter ist (siehe Tabelle 6.1).

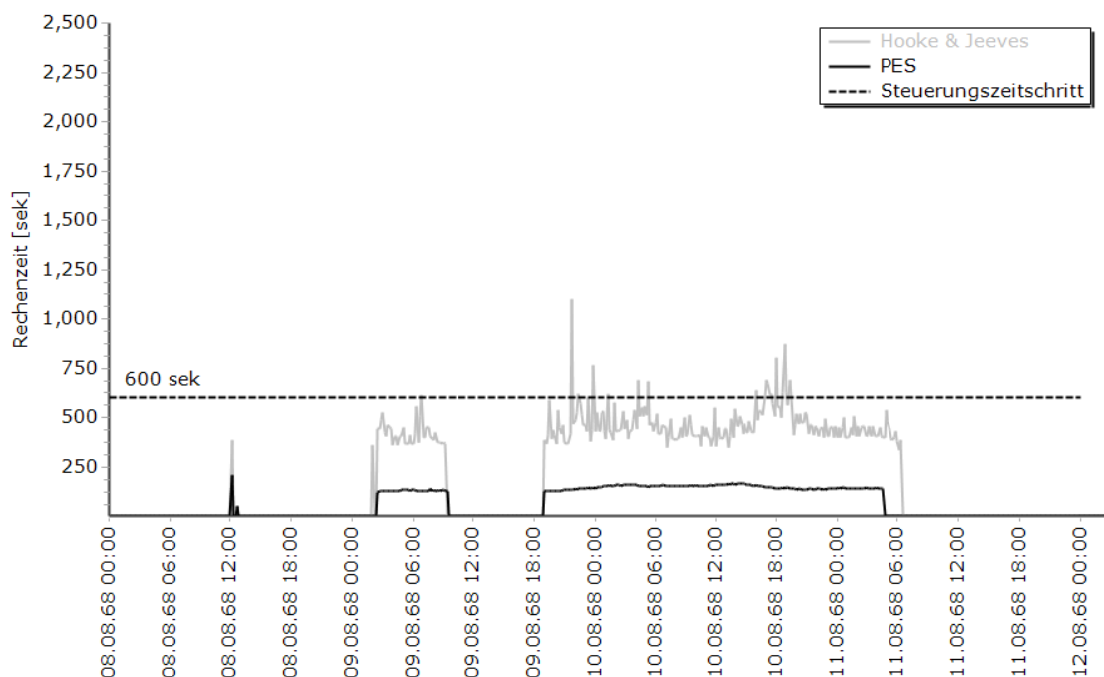


Abbildung 6.2: Rechenzeiten für Fallbeispiel 2 (Evaluierungshorizont: 2 h)

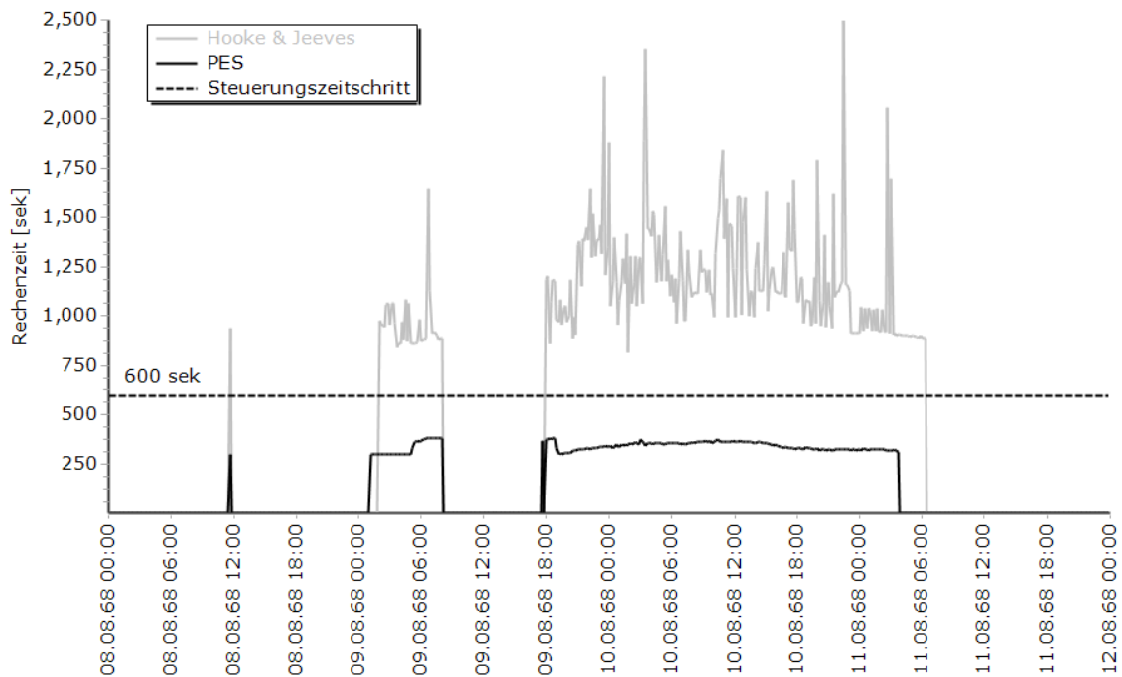


Abbildung 6.3: Rechenzeiten für Fallbeispiel 2 (Evaluierungshorizont: 5 h)

Im dritten Fallbeispiel wurde der Steuerungszeitschritt zur Simulation möglichst realer Bedingungen auf fünf Minuten reduziert. Da in den ersten beiden Fallbeispielen bereits deutlich wurde, dass die zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten nicht ausreichen, um mit einer haltungsgenauen Abbildung zu arbeiten, wurde wieder ein Grobnetz verwendet. Das hydraulische System besitzt somit etwa die gleiche Komplexität wie das zweite Fallbeispiel. Gesteuert werden nun allerdings die Drosselabflüsse von vier Steuerungsorganen. Der Kontrollhorizont wurde auf 30 Minuten reduziert, so dass sich für jeden Steuerungszeitschritt ein Problem mit 20 Optimierungsvariablen ergibt. Wie den Ganglinien in Abbildung 6.4 entnommen werden kann, können beide Optimierungsverfahren trotz des vergleichsweise kurzen Evaluierungshorizonts von zwei Stunden nicht die Steuerungsentscheidungen innerhalb des Steuerungszeitschrittes von 300 Sekunden ermitteln. In dieser Konstellation wäre das System daher nicht in der Praxis einsetzbar. Bei Verwendung eines schnelleren Rechners ist jedoch auszugehen, dass die Rechenzeiten eingehalten werden können.

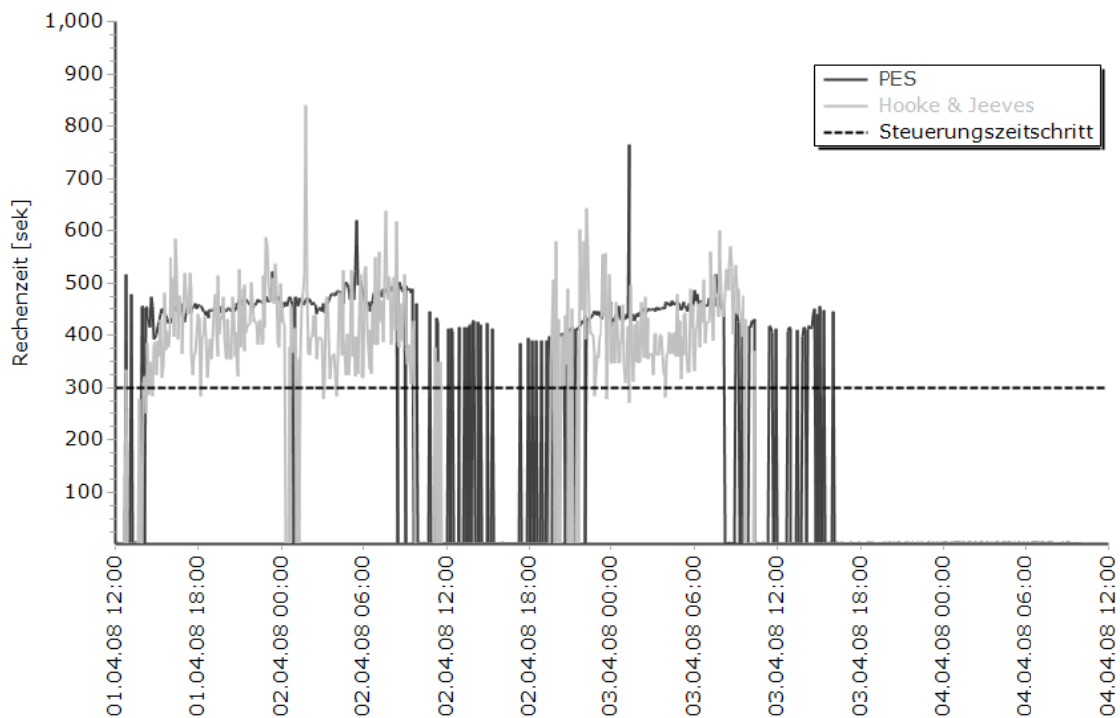


Abbildung 6.4: Rechenzeiten für Fallbeispiel 3

6.3. Bewertung

Bezogen auf die formulierten abfluss- oder schmutzfrachtbasierten Ziele konnte das Betriebsergebnis in allen untersuchten Fällen durch die Steuerungen verbessert werden. Deutliche qualitative Unterschiede zwischen lokalem und globalem Optimierungsverfahren wurden nur in einem Szenario festgestellt, in dem die globalen Evolutionsstrategien wesentlich geringere Entlastungsvolumina ermittelten. Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich ableiten, dass das lokale Verfahren zuverlässig gute Ergebnisse liefert, solange das System klein genug ist, um die Rechenzeitvorgaben des Steuerungszeitschrittes einhalten zu können. Das globale Verfahren kann im Einzelfall bessere Ergebnisse liefern, diese aber nicht gewährleisten.

Der Einsatz des globalen Verfahrens ist somit nur sinnvoll, wenn eine ausreichende Anzahl an Zielfunktionsauswertungen möglich ist. Solange dies nicht gewährleistet werden kann, ist dem lokalen Verfahren der Vorzug zu geben. Die Verwendung des globalen Verfahrens wird somit wesentlich durch die zur Verfügung stehenden Rechenleistungen bestimmt.

Probleme mit numerischen Instabilitäten traten bei den Berechnungen nicht auf. Ein Grund hierfür ist die Verwendung von Grobnetzen, bei denen die Haltungen vergleichsweise lang sind und somit die für explizite numerische Verfahren erforderliche Einhaltung der Courant-Bedingung wesentlich problemloser ist. Betrachtet man die Berechnungsergebnisse der drei Fallbeispiele genauer, lassen sich häufige Änderungen bei den gesteuerten Drosselabflüssen erkennen. Dieses Verhalten ist bei den Evolutionsstrategien deutlich ausgeprägter als bei den lokalen Verfahren. Diese ständigen Einstellungsänderungen an

den Steuerorganen sind in der Praxis unerwünscht, da sie mit einem erhöhten Materialverschleiß verbunden sind. Diese Schwankungen spiegeln sich auch in den Volumen-, Wasserstands und Abflussganglinien der Berechnungsergebnisse wieder. Es handelt sich dabei aber nicht um numerische Instabilitäten, sondern um Veränderungen in der Abflussdynamik aufgrund der Steuerungen.

Die Frage der Rechenzeit ist unmittelbar mit dem Detaillierungsgrad der Modellierung verbunden. Eine haltungsgenaue Modellierung ist wünschenswert, weil die Daten in dieser Form aufgenommen werden und die Erstellung eines Grobnetzes einen erheblichen Arbeitsaufwand mit sich bringt. Es zeigte sich jedoch anhand der in den Fallbeispielen dokumentierten Rechenzeiten, dass eine haltungsgenaue Modellierung im Rahmen der modellprädiktiven Steuerung unrealistisch ist. Entwässerungssysteme weisen nur ab einer Mindestgröße ein relevantes Steuerungspotenzial auf. Eine detaillierte Prozessmodellierung dieser Systeme ist jedoch so rechenzeitaufwändig, dass selbst mit den derzeit schnellsten herkömmlichen Computern keine ausreichende Anzahl an Simulationen innerhalb des Steuerungszeitschrittes durchgeführt werden kann.

Dokumentiert wird dies im dritten Fallbeispiel. Hier konnten die Steuerungsentscheidungen mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung nicht innerhalb von fünf Minuten ermittelt werden. Bei der Verwendung eines schnelleren Rechners oder durch Parallelisierungsansätze für die Evolutionsstrategien wären die notwendigen Rechenzeiten zwar eingehalten worden; extrapoliert man die Rechenzeiten der Software Lamatto aus dem ersten Fallbeispiel, ist auch hier davon auszugehen, dass mit dieser Software die Anforderungen eingehalten werden. Das verwendete Grobnetz besteht jedoch nur aus etwa jeweils 50 Knoten (Schächte und Speicherbecken) und Kanten (Haltungen, Wehre, Drossel), d.h. die detaillierte Modellierung eines Netzes mit mehreren Tausend Haltungen ist nicht möglich.

Mit dem in die Software Lamatto implementierten indirekten, ableitungsbasierten Optimierungsverfahren konnte die Rechenlaufzeit gegenüber BlueM.MPC bei gleicher Steuerungsqualität um ein vielfaches verringert werden. Insofern ist die Entwicklung der Methode grundsätzlich erfolgversprechend. Für die Optimierung sind aber auch hier viele (wenn auch deutlich weniger als bei BlueM.MPC) Simulationsläufe mit dem Prozessmodell erforderlich. Auch die Rechenzeit des Prozessmodells muss daher signifikant reduziert werden. Das als alternative Lösungsmethode eingesetzte Finite-Volumen-Verfahren benötigt jedoch in etwa die gleiche Rechenzeit wie das in den meisten Kanalnetzmodellen eingesetzte Finite-Differenzen-Verfahren.

Die langen Rechenzeiten sind aber auch unter einem anderen Gesichtspunkt ein negativer Faktor. Da die Simulationen praktisch in Echtzeit ablaufen, konnten Langzeitsimulationen im Rahmen der Arbeit nicht durchgeführt werden. Ein häufig genanntes Argument für die modellprädiktive Steuerung gegenüber Offline-Steuerungen ist der geringere Arbeitsaufwand in der Planungsphase. Dies muss jedoch relativiert werden, da bei der praktischen Umsetzung von modellprädiktiven Steuerungen eine Mindestanzahl von Testsimulationen erforderlich ist.

Die abschließende Bewertung orientiert sich an den in Kapitel 2.5 formulierten Fragen zum Forschungsbedarf:

Liefern globale Verfahren bei der Verwendung von direkten Optimierungsmethoden bessere Steuerungsergebnisse als lokale Verfahren?

Globale Verfahren liefern nur in Einzelfällen bessere Steuerungsergebnisse als lokale Verfahren. In den Fallbeispielen ermittelte das globale Verfahren in der überwiegenden Zahl der Fälle keine besseren Ergebnisse, in einigen Fällen sogar schlechtere. Bei einer Bewertung auf der Grundlage aller vorliegenden Berechnungen kommt man daher zu dem Ergebnis, dass die lokale Optimierungsmethode ausreichend gute und vor allem zuverlässigere Ergebnisse liefert. Der Einsatz des globalen Verfahrens ist nur dann sinnvoll, wenn eine ausreichende Anzahl an Zielfunktionsauswertungen möglich ist. Dies kann jedoch bei komplexen Steuerungssystemen, bei denen die Vorteile des globalen Verfahrens zum Tragen kommen, bei den derzeit zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten nicht gewährleistet werden.

Ist die modellprädiktive Steuerung mit hydrodynamischen Modellen auf der Basis indirekter Optimierungsverfahren möglich?

Eine entsprechende Steuerung ist möglich und wurde durch den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik der Uni Erlangen-Nürnberg entwickelt und in die Software Lamatto implementiert. Das Programm wurde an Hand eines einfachen Entwässerungssystems getestet und die Berechnungsergebnisse mit denen von BlueM.MPC verglichen. Die Steuerungsqualität liegt in der gleichen Größenordnung und die Rechenzeiten sind auf Grund der ableitungsbasierten Optimierung um ein vielfaches geringer als die von BlueM.MPC.

Ist der Einsatz von hydrodynamischen Kanalnetzmodellen mit haltungsgenauen Daten für die modellprädiktive Steuerung in absehbarer Zeit möglich und wie können die Rechenzeiten vermindert werden?

Der Einsatz von haltungsgenauen Kanalnetzmodellen ist derzeit nicht möglich, weil die steuerungswürdigen Entwässerungssysteme so groß sind, dass die hydrodynamischen Prozessmodelle auch bei Verwendung aktueller numerischer Lösungsverfahren nicht schnell genug rechnen, um Steuerungsentscheidungen innerhalb weniger Minuten zu generieren. Der Autor schätzt, dass mit den derzeit zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten herkömmlicher Computer und den entwickelten Werkzeugen mittelfristig Systeme mit maximal 1.000 Knoten und Kanten modellprädiktiv gesteuert werden können.

Die derzeit vielversprechendste Methode zur Erhöhung der Rechengeschwindigkeiten ist die Parallelisierung von Rechenprozessen. Dass dies für hydrodynamische Berechnungen grundsätzlich möglich ist, wurde bereits gezeigt. Nach Aussagen der Entwickler ist dies theoretisch auch bei dem für die hydrodynamische Modellierung verwendeten Berechnungsverfahren in Lamatto möglich. Bestrebungen zur Parallelisierung von SWMM5 sind dem Autor nicht bekannt.

Hinsichtlich der Optimierung können Parallelisierungsansätze eingesetzt werden, wenn direkte, globale Optimierungsverfahren zum Einsatz kommen. Entsprechende Verfahren sind in BlueM.Opt bereits implementiert.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurden die Einsatzmöglichkeiten der modellprädiktiven Steuerung in der Entwässerungsplanung untersucht, wobei insbesondere die Verwendung von hydrodynamischen Kanalnetzmodellen sowie die Leistungsfähigkeit von lokalen und globalen Optimierungsmethoden im Mittelpunkt standen. Da die größte Herausforderung bei der modellprädiktiven Steuerung darin besteht, Steuerungsentscheidungen innerhalb eines vorgegebenen Steuerungszeitschritts zu berechnen, wurden zudem Möglichkeiten zur Reduzierung der Rechenzeit untersucht.

Mit BlueM.MPC wurde eine Software entwickelt, die unter Verwendung vorhandener Module zur Prozessmodellierung und Optimierung sowie einem neu geschaffenen Modul zur Prozesssteuerung die modellprädiktive Abflusssteuerung mit hydrodynamischen Berechnungsansätzen ermöglicht. Das Modul zur Prozesssteuerung unterscheidet zwischen Evaluierungs-, Vorhersage- und Kontrollhorizont und berücksichtigt räumlich differenzierte Unsicherheiten bei der Niederschlag- und Zuflussprognose. Die praktische Anwendung von BlueM.MPC erfordert nur wenige zusätzliche Informationen für den Steuerungsprozess. Die Software kann daher mit vertretbarem Aufwand eingesetzt werden. Die hydrodynamische Abfluss- und Schmutzfrachtberechnung wird in BlueM.MPC mit der Software SWMM5 der US-EPA durchgeführt. Zur Optimierung wird die Software BlueM.Opt eingesetzt, die am Fachgebiet für Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung der TU Darmstadt entwickelt wird. SWMM5 ist weltweit das am häufigsten verwendete hydrodynamische Kanalnetzmodell und erfüllt die zwingend erforderlichen Voraussetzungen für modellprädiktive Steuerungen: Zustandsinformationen wie Wasserstände, Abflüsse und Stoffkonzentrationen können abgespeichert und als Anfangsbedingungen in nachfolgenden Simulationen wieder genutzt werden. Zudem können Steuerorgane zeitabhängig gesteuert werden. BlueM.Opt basiert auf direkten Optimierungsmethoden, bei denen das Prozessmodell als Black-Box zur Zielfunktionsauswertung verwendet wird. Das Modul stellt verschiedene lokale und globale Optimierungsmethoden zur Verfügung.

Neben der Software BlueM.MPC wurden in der Arbeit Berechnungsergebnisse der Software Lamatto verwendet. Lamatto wurde durch den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik II der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt. Das Programm ermöglicht ebenfalls die modellprädiktive Steuerung mit einem hydrodynamischen Prozessmodell. Für die Optimierung wird erstmals ein indirektes Verfahren eingesetzt. Zur Prozessmodellierung wird ein eigens programmiertes hydrodynamisches Modell verwendet.

Mit BlueM.MPC und Lamatto konnte die Leistungsfähigkeit zweier Werkzeuge miteinander verglichen werden, die für verschiedene Herangehensweisen an die Thematik stehen: BlueM.MPC repräsentiert eine Ingenieursoftware, die mit bewährten Methoden und Softwaremodulen arbeitet. Die direkte Optimierung ermöglicht den Einsatz von lokalen und globalen Optimierungsmethoden. Lamatto verwendet aktuelle mathematische Methoden, besitzt aber noch den Status einer wissenschaftlichen Software, die noch nicht allgemein einsetzbar ist. Durch die indirekte Optimierung können zudem ausschließlich lokale Optimierungsverfahren eingesetzt werden.

Insgesamt wurden mit BlueM.MPC drei Fallbeispiele untersucht. Für die Software Lamatto standen lediglich Berechnungsergebnisse des ersten Fallbeispiels zur Verfügung. Dieses

Beispiel besteht aus einem einfachen Entwässerungssystem mit wenigen Schächten und Haltungen und zwei Regenüberlaufbecken. In zweiten Fallbeispiel wurde ein Entwässerungssystem mit insgesamt sechs Speicher- und Entlastungsbauwerken und drei Steuerorganen untersucht. Das System stellt das Grobnetz einer Kleinstadt mit 40.000 Einwohnern dar. Für die Untersuchungen wurde es auf die Teilnetze reduziert, die von den Steuerungen beeinflusst werden. Das letztlich für die Steuerungen verwendete System besteht aus etwa 50 Schächten und Haltungen.

Im dritten Fallbeispiel wurde ausgehend vom System des zweiten Fallbeispiels ein stark rückstaubeinflusstes System mit langen Transportsammlern erstellt. An Hand dieses Systems wurde gezeigt, dass eine realitätsnahe Berechnung solcher Kanalnetze hydrodynamische Berechnungsansätze erfordert. In den ersten beiden Fallbeispielen wurde jeweils ein Steuerungszeitschritt von zehn Minuten verwendet, im dritten Fallbeispiel für die Prüfung der Rechenzeitanforderungen ein Steuerungszeitschritt von lediglich fünf Minuten.

In allen Fallbeispielen konnten die Entlastungsvolumina durch die Steuerungen deutlich reduziert werden. In Fallbeispiel 1 ist die Steuerungsqualität von BlueM.MPC und Lamatto gleich groß; die Entlastungsvolumina sind in beiden Fällen fast identisch. Mit BlueM.MPC wurden in Fallbeispiel 1 zudem Berechnungen mit schmutzfrachtbasierten Steuerungszielen durchgeführt, bei denen auch die Entlastungsfrachten deutlich reduziert werden konnten. Die Ergebnisse aller Fallbeispiele zeigen, dass die modellprädiktive Steuerung sowohl mit direkter als auch mit indirekter Optimierung erfolgreich angewendet werden kann.

Zur Überprüfung der Frage, ob globale Verfahren bei der Steuerung von Entwässerungssystemen bessere Ergebnisse hervorbringen als lokale Optimierungsverfahren, wurden bei den Berechnungen mit BlueM.MPC in sämtlichen Szenarien sowohl (globale) Evolutionsstrategien als auch das (lokale) Verfahren von Hooke & Jeeves eingesetzt. Lediglich in einem Szenario des zweiten Fallbeispiels konnte dabei mit den Evolutionsstrategien ein deutlich besseres Steuerungsergebnis gegenüber dem lokalen Verfahren ermittelt werden. In allen anderen Szenarien berechnete das Verfahren von Hooke & Jeeves mindestens gleich gute, in zwei Fällen sogar bessere Ergebnisse. Zumindest in den hier untersuchten Fallbeispielen konnte das lokale Verfahren somit stets ausreichend gute Ergebnisse erzielen. Die Evolutionsstrategien können zwar bessere Ergebnisse ermitteln, diese aber nicht garantieren.

Zur Überprüfung der Rechenzeiten wurde in allen Fallbeispielen die Rechendauer aller Steuerungszeitschritte dokumentiert. BlueM.MPC konnte in den ersten beiden Fallbeispielen die Steuerungsentscheidungen innerhalb des Steuerungszeitschritts von zehn Minuten ermitteln. Im dritten Fallbeispiel, mit einem Steuerungszeitschritt von fünf Minuten und unter Verwendung eines Grobnetzes, war dies nicht der Fall. Eine haltungsgenaue Modellierung von größeren Entwässerungssystemen ist daher mit den allgemein verfügbaren Rechnern derzeit nicht möglich ist.

An Hand von Fallbeispiel 1 konnte gezeigt werden, dass die Software Lamatto deutlich kürzere Rechenzeiten als BlueM.MPC benötigt. Im Mittel war die Rechenzeit bei gleicher Steuerungsqualität etwa um den Faktor 10 kleiner. Die Reduzierung der Rechenzeiten ist

auf die indirekte Optimierung zurückzuführen, die deutlich weniger Zielfunktionsauswertungen erfordert. Das entwickelte hydrodynamische Prozessmodell benötigt etwa die gleiche Rechenzeit wie das in BlueM.MPC verwendete Prozessmodell SWMM5. Trotz der insgesamt deutlich kürzeren Rechenzeiten ist es auch mit Lamatto nicht möglich, große Entwässerungssysteme mit haltungsgenauer Modellierung zu steuern.

Obwohl die Rechenleistungen herkömmlicher Computer auch zukünftig weiter steigen werden, besteht dennoch weiterer Forschungsbedarf bezüglich schnellerer Berechnungsprozesse. Erfolgversprechend erscheinen Parallelisierungsansätze. Diese sind sowohl bei der Prozessmodellierung als auch bei der Optimierung einsetzbar. Entsprechende Möglichkeiten wurden in der Arbeit aufgezeigt, in den Fallbeispielen aber noch nicht berücksichtigt.

Vor allem die Steuerung durch die Evolutionsstrategien führt zu häufigen Veränderungen bei den Stellorganen. Diese sind im praktischen Betrieb unerwünscht. In weitergehenden Untersuchungen sollten daher Möglichkeiten zur Verminderung dieser Änderungen berücksichtigt werden. Dies kann z.B. durch einen zusätzlichen Term in der Zielfunktion erreicht werden.

Mit BlueM.MPC wurde eine Software entwickelt, die aufgrund ihres modularen Aufbaus die Verwendung alternativer Optimierungsverfahren ermöglicht. Bei den Fallbeispielen wurden ein lokales und ein globales Optimierungsverfahren eingesetzt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass künftige Optimierungsverfahren hinsichtlich der Steuerungsqualität und der Rechenzeit besser geeignet sind.

Auch das in BlueM.MPC implementierte Prozessmodell SWMM5 kann erweitert werden. Durch die Implementierung von Ansätzen zur Gewässergütemodellierung ist die Verwendung der Software zur immissionsorientierten Steuerung möglich. Eine Erweiterung zu einem integrierten Simulationsmodell mit dynamischer Kläranlagenmodellierung erscheint jedoch unrealistisch.

Literaturverzeichnis

Adamy J. (2007). *Fuzzy Logik, Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen*, Aachen, Shaker Verlag.

Amdahl G. M. (1967) "Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities" in: Proceedings of the spring joint computer conference, Atlantic City, S. 483–485.

Amdisen L. K., Gavranovic N., und Yde L. (1994). Model-based control - a hydroinformatics approach to real-time control of urban drainage systems. *Journal of Hydraulic Research*, **32**(S1), 35-43.

Anderson J. J. (1970). Real-Time Computer Control of Urban Runoff. *Journal of the Hydraulics Division*, **96**(1), 153-164.

Anderson J. J. und Callery R. L. (1974). Remote Control of Combined Sewer Overflows. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, **46**(11), 2555-2564.

Ashley R., Bertrand-Krajewski J., und Hvitved-Jacobsen T. (2005). Sewer Solids - 20 years of investigation. *Water Science & Technology*, **52**(3), 73-84.

Ashley R., Hvitved-Jacobsen T., und Bertrand-Krajewski J. (1999). Quo Vadis Sewer Process Modelling? *Water Science & Technology*, **39**(9), 9-22.

ATV-Arbeitsgruppe 1.2.4 (1995). Untersuchung zum Steuerungspotenzial von Kanalnetzen. *Korrespondenz Abwasser*, **42**(1), 103-108.

Bach M., Fröhlich F., Heusch S., Hübner C., Muschalla D., Reussner F., und Ostrowski M. (2009) "BlueM – a free software package for integrated river basin management" in: Tag der Hydrologie - Hydrologische Systeme im Wandel, Kiel.

Becker M. und Englmann E. (1986). Steuerung und Regelung in der Wasser- und Abwassertechnik in Forschung und Praxis. *GWF (Wasser - Abwasser)*, **127**(7), 340-344.

Belke D. (1992) "Bemessungsverfahren für Abwasserkanäle - Hydrodynamische Verfahren" in *Abwasserkanäle - Bemessung, Ausführung, Sanierung*. Schriftenreihe des Instituts für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung, Technische Hochschule Darmstadt, Heft 64.

BMBF (2010). *Diskret-kontinuierliche Optimierung komplexer dynamischer Wasserver- und -entsorgungssysteme*, Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Borchardt D. und Günther C. (2004). *Leitfaden für das Erkennen ökologisch kritischer Gewässerbelastungen durch Abwassereinleitungen in Hessen*. Hrsg.: Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz.

Borsanyi P., Benedetti L., Dirckx G., De Keyser W., Muschalla D., Solvi A., Vandenberghe V., Weyand M., und Vanrolleghem P. A. (2008). Modelling real-time

control options on virtual sewer systems. *Journal of Environmental Engineering and Science*, **7**, 395-410.

Brandstetter A., Engel R. L., und Cearlock D. B. (1973). A mathematical model for optimum design and control of metropolitan wastewater management systems. *Journal of the American Water Resources Association*, **9**(6), 1188-1200.

Brdys M., Grochowski M., Gminski T., Konarczak K., und Drewa M. (2008). Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems. *Control Engineering Practice*, **16**(6), 751-767.

Brueck T. M., Knudsen D. I., und Peterson D. F. (1981). Automatic computer-based control of a combined sewer system. *Water Science & Technology*, **13**, 103-109.

Butler D. und Schütze M. (2005). Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, **20**(4), 415-426.

BWK (2007). *BWK M 3: Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse*. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V.

BWK (2008). *BWK M 7: Detaillierte Nachweisführung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gemäß BWK-Merkblatt 3*. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V.

Campisano A. und Modica C. (2002). PID and PLC units for the real-time control of sewer systems. *Water Science & Technology*, **45**(7), 95-103.

Carstensen J., Nielsen M. K., und Harremoes P. (1996). Predictive control of sewer systems by means of grey-box models. *Water Science & Technology*, **34**(3-4), 189-194.

Cassar A. (2000). *Planung, Betrieb und Wirksamkeitsanalyse von Kanalnetzsteuerungen mit simulationsgestützter Entscheidungsfindung*, Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz der Universität Hannover, Heft 22, Hannover.

Cassar A. und Redder A. (1997). Echtzeit-Verbundsteuerung städtischer Entwässerungssysteme unter Verwendung radargemessener Niederschläge. *Abwassertechnik*, **48**, 22-26.

Cembrano G., Quevedo J., Salamero M., Puig V., Figueras J., und Martí J. (2004). Optimal control of urban drainage systems. A case study. *Control Engineering Practice*, **12**(1), 1-9.

Darsono S. und Labadie J. W. (2007). Neural-optimal control algorithm for real-time regulation of in-line storage in combined sewer systems. *Environmental Modelling & Software*, **22**(9), S. 1349-1361.

Deb K. und Goel T. (2001) "A hybrid multi-objective evolutionary approach to engineering shape design" in: *Evolutionary Multi-Criterion Optimization - Lecture Notes in Computer Sciences*, Springer Berlin, S. 385-399.

Detering M. (2002). Modellgestützte Regelung von Stauhaltungssystemen und Laufwasserkraftanlagen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Dittmar R. und Pfeiffer B. (2004). *Modellbasierte prädiktive Regelung*. München Wien, Oldenbourg.

Dittmer U. (2008) "Messen in Entwässerungssystemen - Möglichkeiten und Grenzen" in Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium "Betrieb und Sanierung von Entwässerungssystemen". Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 195. Stuttgart, 19-49.

Dochain D. und Vanrolleghem P. (2001). *Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes*, London, IWA Publishing.

Dohmann M. und Weyand M. (1990). *Analyse und Klassifizierung lokaler Steuerungseinrichtungen in Kanalisationen*. Aachen, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.

Duchesne S., Mailhot A., Dequidt E., und Villeneuve J. (2001). Mathematical modeling of sewers under surcharge for real time control of combined sewer overflows. *Urban Water*, **3**(4), S. 241-252.

Duchesne S., Mailhot A., und Villeneuve J. (2004). Global Predictive Real-Time Control of Sewers Allowing Surcharged Flows. *Journal of Environmental Engineering*, **130**(5), 526-534.

DWA (2006). *DWA-A 100: Leitlinien zur integralen Siedlungsentwässerung*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

DWA (2007). *DWA-M 153: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

DWA (2005). *DWA-M 180 - Handlungsrahmen zur Planung der Abflusssteuerung in Kanalnetzen*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

Dyck S. und Peschke G. (1995). *Grundlagen der Hydrologie*, Verlag für Bauwesen.

Einfalt T. und Simon M. (2001). *Systematischer Aufbau von Simulationen zur Abflusssteuerung in Hinblick auf eine Genehmigungsfähigkeit*, VDI-Berichte Nr. 1619.

Englmann E., Lohmann J., Schilling W., und Schlegel S. (1986). Instrumentation and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems. *Korrespondenz Abwasser*, **33**(7), S. 559-562.

Entem S., Lahoud A., Yde L., und Bendsen B. (1998). Real time control of the sewer system of boulogne billancourt - a contribution to improving the water quality of the seine. *Water Science & Technology*, **37**(1), 327-332.

Erbe V. (2004). *Entwicklung eines integralen Modellansatzes zur immissionsorientierten*

Bewirtschaftung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer, Schriftenreihe des Lehrstuhls Abfallwirtschaft und Siedlungswasserwirtschaft der Bauhaus-Universität Weimar, Heft 13, Weimar.

Erbe V. (2006) "Handlungsrahmen zur Planung der Abflusssteuerung in Kanalnetzen" in Abflusssteuerung - Schwallspülung - Gewässerschutz. Osnabrück, DBU.

Erbe V. (2002) "Kanalnetzsteuerung - Überblick über umgesetzte Projekte und Erfahrungen aus der Praxis" in: Dresdner Seminar Wasserbau und Wasserwirtschaft "Innovationen in der Abwasserableitung und Abwassersteuerung". Dresdner Berichte, Band 19, S. 35-51.

Erbe V., Beeneken T., Gatke D., Meßmer A., Scheer M., Schütze M., Schumacher B., und Weyand M. (2009). Abflusssteuerung - Diskussion des Mehraufwandes gegenüber ungesteuerten Systemen. *Korrespondenz Abwasser*, **56**(2), 131-138.

Erbe V., Frehmann T., Geiger W. F., Krebs P., Londong J., Rosenwinkel K., und Seggelke K. (2002). Integrated modelling as an analytical and optimisation tool for urban watershed management. *Water Science and Technology*, **46**(6-7), 141-150.

Erbe V. und Schütze M. (2005). An integrated modelling concept for immission-based management of sewer system, wastewater treatment plant and river. *Water Science & Technology*, **52**(5), 95 - 103.

EU (2000). *Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*.

Fach S., Kleidorfer M., Möderl M., und Rauch W. (2008). Abgleich von hydrologischen und hydrodynamischem Modell zur Verringerung der Unsicherheiten bei begrenzter Datengrundlage am Beispiel von Linz. *Korrespondenz Abwasser*, **55**(7), 756-765.

Fach S., Möderl M., und Rauch W. (2007). Umsetzung von Kanalnetzsteuerungen in hydrologischen Modellen am Beispiel von Linz. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, **59**(9), 131-137.

Fahrner H. (1996) "Messdatenerfassung, Steuer-, Regel- und Fernübertragungstechnik" in: W. Schilling (Hrsg.), *Praktische Aspekte der Abflusssteuerung in Kanalnetzen*. Oldenbourg Verlag, S. 75-119.

Frehmann T., Niemann A., Ustohal P., und Geiger W. F. (2002). Effects of real time control of sewer systems on treatment plant performance and receiving water quality. *Water Science and Technology*, **45**(3), 229-37.

Fu G., Butler D., und Khu S. (2008). Multiple objective optimal control of integrated urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, **23**(2), 225-234.

Fuchs L. (2005). Abflusssteuerung in der Städtenwässerung. TA-Hannover / Newsletter. Online unter http://www.ta-hannover.de/newsletter/2005/08_05/fuchs.pdf.

Fuchs L. (2002) "Aspekte der Abflusssteuerung" in Dresdner Seminar Wasserbau und Wasserwirtschaft "Innovationen in der Abwasserableitung und Abwassersteuerung". Dresdner Berichte, Band 19, 53 - 74.

Fuchs L., Beeneken T., Nowak R., und Pfannhauser G. (2007). Entwicklung und Implementierung einer Abflusssteuerung für das Kanalnetz der Stadt Wien. KA - Abwasser, Abfall, **54**(7), 680-689.

Gamerith V., Muschalla D., Könemann P., und Gruber G. (2009). Pollution load modelling in sewer systems: an approach of combining long term online sensor data with multi-objective auto-calibration schemes. Water Science & Technology, **59**(1), 73.

Garcia H. J. M. (1996). *Combined Logical-numerical Enhancement of Real-time Control of Urban Drainage Networks*, Taylor & Francis.

Geiger W. F. (1986) "Abfluss- und schmutzfrachtorientierte Kanalnetzsteuerung - Möglichkeiten und Grenzen" in T. G. Schmitt und H. H. Hahn (Hrsg.): Schmutzfrachtberechnung für Kanalisationsnetze. Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Heft 44, Universität Karlsruhe.

Gelormino M. S. und Ricker N. L. (1994). Model-predictive control of a combined sewer system. International Journal of Control, **59**(3), 793-816.

Gibbs C. V., Alexander S. M., und Leiser C. P. (1972). System for Regulation of Combined Sewage Flows. Journal of the Sanitary Engineering Division, **98**(6), 951-972.

Gille S., Fiorelli D., Henry E., und Klepizewski K. (2008) "Optimal operation of a sewer network using a simplified hydraulic model" in Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh.

Gruber G., Bertrand-Krajewski J. L., De Beneditis J., Hochedlinger M., und Lettl W. (2006). Practical aspects, experiences and strategies by using UV/VIS sensors for long-term sewer monitoring. Water Practice & Technology, **1**(1).

Grüning H. (2008). Abflusssteuerung - quo vadis? Korrespondenz Abwasser, **55**(4), 5.

Grüning H. (2002). *Ein Modell zur simultanen Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage unter Berücksichtigung resultierender Gewässerbelastungen*, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Band 42, Ruhr-Universität Bochum.

Grüning H. (2009). Regenwassereinleitungen in kanalisierte Gewässer. Korrespondenz Abwasser, **56**(2), 153-157.

Grüning H. und Hoppe H. (2008) "Spectrophotometric applications in wastewater and storm water sewers" in Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh.

Grüning H., Hoppe H., und Weilandt M. (2001). Online-Messung in Kanalisationsnetzen. Korrespondenz Abwasser, **48**(6), 763-766.

Haas U., Jacob K., Kreutz D., Männig F., Pfeffer S., Reder C., und Weilandt M. (2009). Risiko- und Störungsanalysen bei Einsatz von Abflusssteuerungen in Kanalnetzen. Korrespondenz Abwasser, **56**(2), 139-143.

Hajda P., Novotny V., Feng X., und Yang R. L. (1998). Simple feedback logic, genetic algorithms and artificial neural networks for real-time control of a collection system. Water Science & Technology, **38**(3), 187-195.

Harremoes P. (1991) "Real Time Control - In Context" in C. Maksimovic (Hrsg.): New Technologies in Urban Drainage - International Conference on Urban Drainage and New Technologies in Dubrovnik, Yugoslavia.

Harremoes P., Hvitved-Jacobsen T., Lynggaard-Jensen A., und Nielsen B. (1994). Municipal wastewater systems, integrated approach to design, monitoring and control. Water Science & Technology, **29**(1-2), 419-426.

Harremoes P. und Rauch W. (1999). Optimal design and real time control of the integrated urban run-off system. Hydrobiologia, **1999**(410), 177-184.

Henze M., Gujer W., Loosdrecht M. V., und Mino T. (2000). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, London, IWA Publishing.

Heusch S., Kamradt B., und Ostrowski M. (2010). Simulation of wastewater treatment plant within integrated urban wastewater models. Water Science & Technology, **61**(10), 2645-2652.

Heusch S., Hild J., Leugering G., und Ostrowski M. (2009) "Model Predictive Control with Derivative Based Optimization Algorithms for Hydrodynamic Models" in Proceedings of the 8th International Conference on Urban Drainage Modelling. Tokio.

Heusch S., Ostrowski M., Hild J., und Leugering G. (2009) "Kooperative Entwicklungen für die Echtzeitsteuerung von Kanalnetzsteuerungen" in Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen. VDI-Berichte Nr. 2073.

Hilmer T. (2008). *Water in Society: Integrated Optimisation of Sewerage Systems and Wastewater Treatment Plants with Computational Intelligence Tools*, Mensch & Buch.

Hofbauer P., Heindl M., und Blauhut H. (2009). Moderne Kanalnetzbewirtschaftung für die Stadt Linz. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, **61**(11), 21-29.

Hooke R. und Jeeves T. A. (1961). "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems. Journal of the ACM, **8**(2), 212-229.

HSGSim (2008). *HSG-Leitfaden: Integrierte Modellierung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer*, Hochschulgruppe Erfahrungsaustausch Dynamische Simulation in der Siedlungswasserwirtschaft. Online unter <http://www.hsgsim.org>.

Hüben S. und Einfalt T. (2006) "Abflusssteuerung am Beispiel: Theorie, Umsetzung und Erfahrungen" in "Abflusssteuerung - Schwallspülung - Gewässerschutz". Abflusssteuerung - Schwallspülung - Gewässerschutz. Osnabrück.

Hübner C. (2010). Memetische evolutionäre Optimierung von Hochwasserspeichersystemen. Dissertation, Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, Technische Universität Darmstadt.

IAWPRC (1989). *Real-time control of urban drainage systems*. London, Task Group on Real-Time Control of Drainage Systems.

Jakobs J. (1998). *Quantifizierung der Wirkung von Kanalnetzbewirtschaftungsmassnahmen mit Hilfe des detailliert hydrodynamischen Schmutzfrachtmodells Hauss*, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Heft 84, Karlsruhe.

Jorgensen M., Schilling W., und Harremoes P. (1995). General assessment of potential CSO reduction by means of real time control. *Water Science & Technology*, **32**(1), 249-257.

Kerber D. (2009). Entwicklung eines multi-kriteriellen, hybriden Optimierungsalgorithmus für den Einsatz in der Kanalnetzsteuerung. Diplomarbeit am Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, Technische Universität Darmstadt.

Khelil A., Albrecht M., und Broll-Bickhardt J. (1994). Steuerung eines Entwässerungskanals mit Hilfe eines regelbasierten Systems. *Korrespondenz Abwasser*, **1994**(5), 5.

Khelil A., Achatz S., Anton H., Eberl H., Wilderer P., und Schaad P. (1998). On-line-Vorhersage der Zuflussbelastung eines Entwässerungssystems. *Korrespondenz Abwasser*, **45**(8), 1471-1482.

Khelil A. und Schneider S. (1991). Developement of a control strategy to reduce combined sewerage overflows: The case of Bremen - left of the Weser. *Water Science & Technology*, **24**(6), 201-208.

Kraft M. (1996) "Untersuchung zum Steuerungspotenzial" in W. Schilling (hrsg.), *Praktische Aspekte der Abflusssteuerung in Kanalnetzen*. Oldenbourg Verlag, 17-30.

Kraus T. (2008) "Durchflussmessungen - Theorie und Praxis" in 4. Frankfurter Abwassersymposium "Messen, Steuern, Regeln in der Entwässerung". Frankfurt, 45-58.

Krebs P., Holzer P., Huisman J. L., und Rauch W. (1999). First flush of dissolved compounds. *Water Science and Technology*, **39**(9), 55-62.

Krebs P. und Rauch W. (2002) "Von der Abflusssteuerung zur immissionsorientierten Steuerung" in: *Dresdner Seminar Wasserbau und Wasserwirtschaft "Innovationen in der Abwasserableitung und Abwassersteuerung"*. Dresdner Berichte, Band 19, S. 87-109.

Kroll A. und Abel D. (2006). Modellbasierte Prädiktive Regelung. at - Automatisierungstechnik, **54**(12), 587-589.

Labadie J. W., Grigg N. S., und Bradford B. H. (1975). Automatic control of large-scale combined sewer systems. Journal of the Environmental Engineering Division, **101**(1), S. 27-39.

Labadie J. W. (2004). Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. Journal of Water Resources Planning and Management, **130**(2), S. 93-111.

Labadie J. W., Grigg N. S., und Trotta P. D. (1974). Minimization of combined sewer overflows by large-scale mathematical programming. Computers & Operations Research, **1**(3-4), S. 421-435.

Lijklema L., Tyson J. M., und Lesouef A. (1993). Interactions between sewers, treatment plants and receiving waters in urban areas: a summary of the INTERURBA'92 workshop conclusions. Water Science and Technology, **27**(12), S. 1-29.

Lobbrecht A. H. und Solomatine D. P. (2002). Machine learning in real-time control of water systems. Urban Water, **4**(3), 283-289.

Maeda M., Mizushima H., und Ito K. (2005). Development of the real-time control (RTC) system for Tokyo sewage system. Water Science & Technology, **15**(2), 213-220.

Mang J., Fuchs L., Löwe R., Möhring B., und Beeneken T. (2010). Untersuchung des Steuerungspotenzials im Einzugsgebiet der Kläranlagen Bottrop und Emschermündung. Korrespondenz Abwasser, **57**(6), 567-575.

Maniak U. (2010). *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*, Springer Verlag.

Männig F. (2006). Abflusssteuerung des Dresdner Mischwassernetzes. Wasser und Abfall, (1-2), S. 10-15.

Marinaki M. und Papageorgiou M. (2005). *Optimal Real-time Control of Sewer Networks*, Springer.

Mark O., Hernebring C., und Magnusson P. (1998). Optimisation and control of the inflow to a wastewater treatment plant using integrated modelling tools. Water Science & Technology, **37**(1), 347-354.

Martínez Ocampo C. A. (2007). Model Predictive Control of Complex Systems including Fault Tolerance Capabilities: Application to sewer networks. Dissertation, Technical University of Catalonia.

Meirlaen J., Van Assel J., und Vanrolleghem P. (2002). Real time control of the integrated urban wastewater system using simultaneously simulating surrogate models. Water Science & Technology, **45**(3), 109-116.

Meirlaen J. (2002). Immission based real-time control of the integrated urban wastewater system. Dissertation, Universität Gent.

Meßmer A. und Papageorgiou M. (1996) “Verbundsteuerstrategien und lokale Regelungen” in W. Schilling (Hrsg.): Praktische Aspekte der Abflusssteuerung in Kanalnetzen. Oldenbourg, 59-73.

Meßmer A. und Papageorgiou M. (2009). Ein generischer Regelungsansatz auf der Basis nichtlinearer Optimierung für komplexe Prozesse. at - Automatisierungstechnik, **57**(12), 613-623.

Meßmer A. und Papageorgiou M. (1992). Multireservoir Sewer-Network Control Via Multivariable Feedback. Journal of Water Resources Planning and Management, **118**(6), 585-602.

Methot J. F. und Pleau M. (1997). The effects of uncertainties on the control performance of sewer networks. Water Science & Technology, **36**(5), 309-315.

Muschalla D., Pelletier G., Berrouard E., Carpenter J., Vallet B., und Vanrolleghem P. (2009) “Ecohydraulic-driven real-time control of stormwater basins” in Proceedings of the 8th International Conference on Urban Drainage Modelling. Tokio.

Muschalla D. (2006). *Evolutionäre multikriterielle Optimierung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme*, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt, Heft 137, Darmstadt.

Muschalla D., Fröhlich F., Heusch S., Hübner C., Kerber D., Reussner F., und Ostrowski M. (2009) “BlueM.Opt - a generic framework for simulation based optimization” in Proceedings of the 18th Conference on Stormwater and Urban Water Drainage Systems Modeling. Toronto.

Nelen A. J. (1992). Optimized control of urban drainage systems. Dissertation, Technische Universität Delft.

Nielsen M. K., Carstensen J., und Harremoes P. (1996). Combined control of sewer and treatment plant during rainstorm. Water Science & Technology, **34**(3-4), 181-187.

Norreys R. und Cluckie I. (1997). A novel approach to the real-time modelling of large urban drainage systems. Water Science & Technology, **36**(8-9), 19-24.

Novotny V., Capodaglio A., und Jones H. (1992). Real Time Control of wastewater treatment operations. Water Science & Technology, **25**(4-5).

Nowak R. (2005). RTC - Die zukunftsweisende Kanalnetzsteuerung in Wien. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, **57**(11), a9-a11.

Ostrowski M. W. (1991) "The management of urban catchments" in New Technologies in Urban Drainage - International Conference on Urban Drainage and New Technologies in Dubrovnik, Yugoslavia.

Ostrowski M. W., Wittpohl W., und Wolf U. (1989). Kombinierte Niedrigwasser- und Gütesimulation für die Volme. Vom Wasser, **73**, 227-239.

Ostrowski M. (2009). *Ingenieurhydrologie I*. Vorlesungsskript, Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, Technische Universität Darmstadt.

Ostrowski M. (2008). *Ingenieurhydrologie II*. Vorlesungsskript, Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, Technische Universität Darmstadt.

Ostrowski M., Reussner F., Schneider S., und Muschalla D. (2007). *Dokumentation des Schmutzfrachtmodells SMUSI*, Darmstadt.

Papageorgiou M. (1983). Automatic Control Strategies for Combined Sewer Systems. Journal of Environmental Engineering, **109**(6), 1385-1402.

Papageorgiou M. (1985). Optimal Multireservoir Network Control by the Discrete Maximum Principle. Water Resources Research, **21**(12), 1824-1830.

Papageorgiou M., Beckel K., und Mevius F. (1987). Zur optimalen Echtzeit-Steuerung der Abfluvorgänge in städtischen Abwassernetzen. Korrespondenz Abwasser, **34**(5), 438-446.

Park Y., Shamma J. S., und Harmon T. C. (2009). A Receding Horizon Control algorithm for adaptive management of soil moisture and chemical levels during irrigation. Environmental Modelling & Software, **24**(9), 1112-1121.

Patry G. G. (1983). Linear Programming Model for the Control of Combined Sewer Systems with off-line Storage Facilities. Canadian Water Resources Journal, **8**(1), 83-105.

Petruck A., Cassar A., und Dettmar J. (1998). Advanced real time control of a combined sewer system. Water Science & Technology, **37**(1), 319-326.

Pfeffer S. und Haas U. (2010). Messwerterfassung und Datenübertragung für die Abflusssteuerung in Kanalnetzen aus praktischer Sicht. Korrespondenz Abwasser, **57**(6), 532-538.

Pfister A. (1999). Online-Kanalnetzsteuerung: Realisierung einer Abflusssteuerung unter Verwendung radargemessener Niederschläge. Korrespondenz Abwasser, **46**(2).

Pfister A. und Cassar A. (1999). Use and benefit of radar rainfall data in an urban real time control project. Physics and Chemistry of the Earth Part B-Hydrology Oceans and Atmosphere, **24**(8), 903-908.

Pirsing A., Rosen R., Obst B., und Montrone F. (2006). Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren bei der Abflusssteuerung in Kanalnetzen. GWF (Wasser - Abwasser), **147**(5), 376-383.

Pleau M., Methot J. F., Lebrun A., und Colas H. (1996). Minimizing combined sewer overflows in real-time control applications. Water Quality Research Journal of Canada, **31**, 775-786.

Pleau M., Colas H., Lavallee P., Pelletier G., und Bonin R. (2005). Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system. Environment Modelling & Software, **20**(2005), 401-413.

Pleau M., Pelletier G., Colas H., Lavallee P., und Bonin R. (2001). Global predictive real-time control of Quebec Urban Community's westerly sewer network. Water Science & Technology, **43**(7), 123-130.

Puig V., Romera J., Quevedo J., Cardona C., Salterain A., Ayesa E., Irizar I., Castro A., Lujan M., Charbonnaud P., Chiron P., und Trouvat J. (2009). Optimal predictive control of water transport systems: Arret-Darre/Arros case study. Water Science & Technology, **60**(8), 2125-2133.

Rauch W., Aalderink H., Krebs P., Schilling W., und Vanrolleghem P. (1998). Requirements for integrated wastewater models -- driven by receiving water objectives. Water Science & Technology, **38**(11), 97-104.

Rauch W. und Harremoes P. (1998). Correlation of combined sewer overflow reduction due to real-time control and resulting effect on the oxygen concentration in the river. Water Science and Technology, **37**(12), 69-76.

Rauch W. und Harremoes P. (1999). Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems. Water Research, **33**(5), 1265-1277.

Rauch W., Seggelke K., Brown R., und Krebs P. (2005). Integrated Approaches in Urban Storm Drainage: Where Do We Stand? Environmental Management, **35**(4), 396-409.

Rechenberg I. (1994). *Evolutionsstrategie'94*, Stuttgart, Frommann-Holzboog.

Reichert P., Borchardt D., Henze M., Rauch W., Shanahan P., Somlyódy L., und Vanrolleghem P. (2001). *River Water Quality Model No. 1*, London, IWA Publishing.

Reichl G. (2006). *Optimierte Bewirtschaftung von Kläranlagen basierend auf der Modellierung mit Modelica*, Cuvillier Verlag.

Risholt L., Schilling W., Erbe V., und Alex J. (2002). Pollution based real time control of wastewater systems. Water Science & Technology, **45**(3), 219-228.

Rohlfing R. (1994). Echtzeitsteuerung von Entwässerungssystemen mit Optimierungsverfahren - Durchführbarkeitsanalyse mit hydrodynamischer Simulation der Abflussvorgänge. Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz der Universität Hannover, Heft 8, Hannover.

Rossman L. (2008). *Storm Water Management Model, User's Manual, Version 5.0*, US EPA.

Rossman L. (2006). *SWMM Quality Assurance Report: Dynamic Flow Routing*, US-EPA.

Scheer M. (2008). *Ermittlung und Bewertung der Wirkungen der Abflusssteuerungen für Kanalisationssysteme*, Schriftenreihe des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Band 131, Universität Karlsruhe.

Scheer M., Heppeler D., Krapp G., Nusch S., und Meßmer A. (2004) "Real time control of an integrated system - sewer system and wastewater treatment plant - of the Wastewater association Obere Iller" in Proceedings of the 6th Int. Conference on Urban Drainage Modelling, Dresden, 691-700.

Scheer M., Wörner D., Abel C., Eschke P., Michel A., Simon K., Becker T., und Theilen U. (2006) "Abflusssteuerung im Projekt ASTREIN" in Abflusssteuerung - Schwallspülung - Gewässerschutz. Osnabrück.

Schilling W. (1987). Operationelle Stadtentwässerung. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlicher Wasserbau der Universität Hannover, Heft 64, Hannover.

Schilling W. (1986a). 15 Jahre Kanalnetzsteuerung in den USA - Was wurde erreicht? Korrespondenz Abwasser, **33**(2), 147-151.

Schilling W. (2002) "Abflusssteuerung - Einführung und Ziele" in Dresdner Seminar Wasserbau und Wasserwirtschaft "Innovationen in der Abwasserableitung und Abwassersteuerung". Dresdner Berichte, Band 19., 1-20.

Schilling W. (1990). *Operationelle Siedlungsentwässerung: Konzeptionen zur Abflußsteuerung und Speicherbewirtschaftung in Entwässerungssystemen*, Oldenbourg Verlag.

Schilling W. (1986b). Technische Aspekte der Kanalnetzsteuerung an Beispielen nordamerikanischer Systeme. GWF (Wasser - Abwasser), **127**(7), 324-332.

Schilling W., Andersson B., Nyberg U., Aspegren H., Rauch W., und Harremoes P. (1996). Real time control of wastewater systems. Journal of Hydraulic Research, **34**(6), 785-797.

Schindler N., Krebs P., Ogurek M., und Schütze M. (2007). Vereinfachte integrierte Modelle der Abwasserentsorgung zur Analyse von Steuerstrategien. KA - Abwasser, Abfall, **54**(6), 577-583.

Schmitt T. G. (1985). *Der instationäre Kanalabfluss in der Schmutzfrachtmodellierung*. Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Heft 42, Universität Karlsruhe.

Schutz G., Fiorelli D., Seiffert S., und Klepischewski K. (2009). "Optimierte Regelung eines Abwassernetzes" in VDI Wissensforum (Hrsg.): Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen. VDI-Berichte 2073, S. 237-247.

Schütze M., Butler D., und Beck M. B. (2001). Parameter optimisation of real-time control strategies for urban wastewater systems. *Water Science and Technology*, **43**(7), 139-146.

Schütze M., Butler D., und Beck M. B. (2002). *Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems*, Springer Verlag.

Schütze M., Butler D., und Beck M. B. (1999). Optimisation of control strategies for the urban wastewater system - An integrated approach. *Water Science and Technology*, **39**(9), 209-216.

Schütze M., Butler D., Beck M. B., und Verworn H. (2002). Criteria for assessment of the operational potential of the urban wastewater system. *Water Science & Technology*, **45**(3), 141-148.

Schütze M., Campisano A., Colas H., Schilling W., und Vanrolleghem P. A. (2004). Real time control of urban wastewater systems--where do we stand today? *Journal of Hydrology*, **299**(3-4), 335-348.

Schütze M., Ogurek M., Meßmer A., und Scheer M. (2007). *Kanalnetzdemostrator*. Online unter <http://www.ifak.eu/index.php?id=48> [Zugriff am 24.11.2010].

Schütze M. und To T. B. (2002) "Steuerung von urbanen Entwässerungssystemen mit Hilfe multikriterieller Optimierungsverfahren" in Dresdner Seminar Wasserbau und Wasserwirtschaft "Innovationen in der Abwasserableitung und Abwassersteuerung". Dresdner , Band 19. Dresden, TU Dresden, 111-127.

Schwefel H. (1995). *Evolution and Optimum Seeking*, Wiley.

Seggelke K. (2002). Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage zur Reduzierung der Gewässerbelastung.

Seggelke K., Tränckner J., Fuchs L., und Krebs P. (2009). Fuzzybasierte Regelung des Mischwasserzuflusses. *Korrespondenz Abwasser*, **56**(2), 144-152.

Setz C., Heinrich A., Rostalski P., Papafotiou G., und Morari M. (2008) "Application of model predictive control to a cascade of river power plants" in Proceedings of the 17th IFAC World Congress. Seoul.

Stirrup M., Vitasovic Z., und Strand E. (1997). Real-time control of Combined Sewer Overflows in Hamilton-Wentworth Region. *Water Quality Research Journal of Canada*, **32**(1), 155-168.

-
- Syrjakow M. (2005). *Simulationstechnik*. Vorlesungsskript, Berufsakademie Mannheim.
- Tandler R. (1994). Ansätze für eine parallele Überstauberechnung von Kanalnetzen. *Korrespondenz Abwasser*, **41**(10), 1750-1761.
- Tolson B. A. und Shoemaker C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, **43** - **W01413**.
- Trotta P. D., Labadie J. W., und Grigg N. S. (1977). Automatic control strategies for urban stormwater. *Journal of the Hydraulics Division*, **103**(12), 1443-1459.
- Vanrolleghem P., Benedetti L., und Meirlaen J. (2005). Modelling and Real-Time-Control of the Integrated Urban Wastewater System. *Environment Modelling & Software*, **20**(2005), 427-442.
- Verworn H. (1999). *Die Anwendung von Kanalnetzmodellen in der Stadthydrologie*, Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz der Universität Hannover, Heft 18, Hannover.
- Verworn W. (1980). *Hydrodynamische Kanalnetzberechnung und die Auswirkungen von Vereinfachungen der Bewegungsgleichungen*, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaft, Heft 47, Universität Hannover.
- Weinreich G., Schilling W., Birkely A., und Moland T. (1997). Pollution based real time control strategies for combined sewer systems. *Water Science & Technology*, **36**(8-9), 331-336.
- Weyand M. (1992). *Kanalnetzbewirtschaftung - ein Mittel zur Optimierung der Abwasserentsorgung*, Gewässerschutz - Wasser - Abwasser (GWA), Band 132, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Weyand M. (2001). Regelungstechnische Aspekte bei der Abflusssteuerung in Kanalnetzen. *Korrespondenz Abwasser*, **48**(6), 835-843.
- Weyand M., Schilling W., und Broll-Bickhardt J. (2000). Wirtschaftlichkeit und Effektivität der Kanalnetzsteuerung. *Korrespondenz Abwasser*, **47**(2), 223-232.
- Wiese J., Simon J., und Schmitt T. (2005). Integrated real-time control for a sequencing batch reactor plant and a combined sewer system. *Water Science & Technology*, **52**(5), 179-186.
- Yuan J. M., Tilford K. A., Jiang H. Y., und Cluckie I. D. (1999). Real-time urban drainage system modelling using weather radar rainfall data. *Physics and Chemistry of the Earth Part B-Hydrology Oceans and Atmosphere*, **24**(8), 915-919.
- Zacharof A. I., Butler D., Schutze M., und Beck M. B. (2004). Screening for real-time control potential of urban wastewater systems. *Journal of Hydrology*, **299**(3-4), 349-362.

Zunic F. und Seus G. J. (1993a). On-line-Abflußsteuerung in vermaschten Kanalisations-systemen mit Rückhaltemöglichkeiten, Teil 1: Das Steuerungskonzept. Korrespondenz Abwasser, **40**(11), 1763-1773.

Zunic F. und Seus G. J. (1993). On-line-Abflußsteuerung in vermaschten Kanalisationssys-temen mit Rückhaltemöglichkeiten, Teil 2: Erprobung des Vermaschungs- und Steue-rungskonzeptes und Ergebnisse. Korrespondenz Abwasser, **40**(12), 1881-1888.

Zunic F. (1991). *Gezielte Vermaschung bestehender Kanalisationssysteme: Methodische Studien zur Aktivierung freier Rückhalteräume unter besonderer Berücksichtigung der Abflusssteuerung*, Berichte der Versuchsanstalt Oberrach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der TU München, Heft 68, München.



Anhang 1: Ergebnissganglinien für Fallbeispiel 2

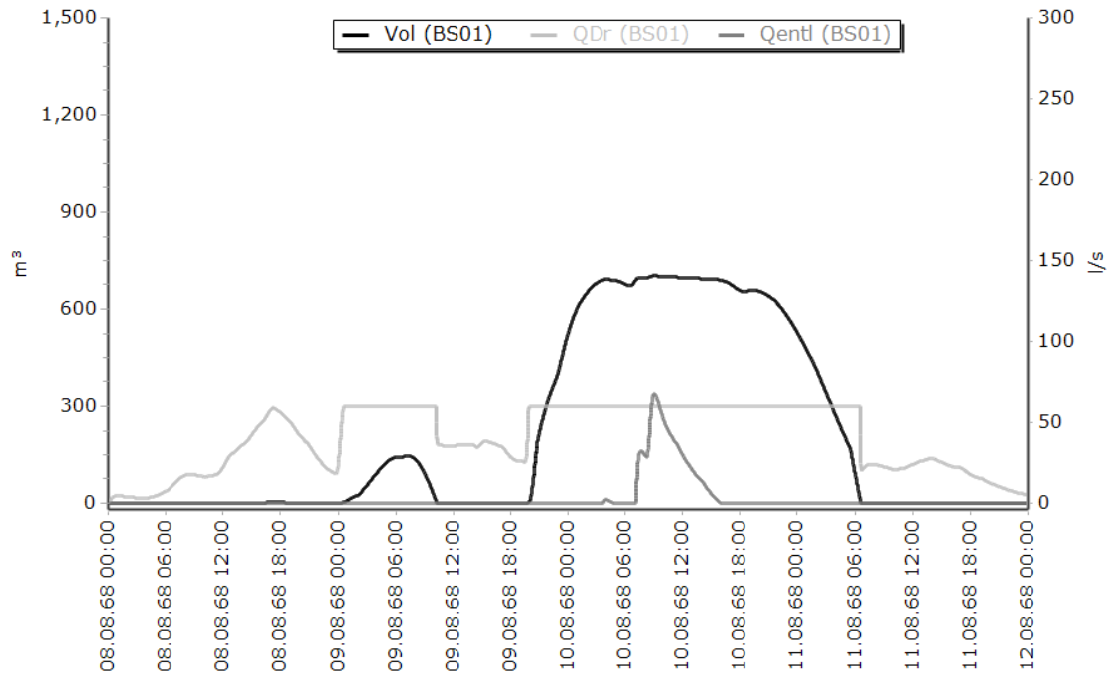


Abbildung A1.1: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS01 (Ungesteuertes System)

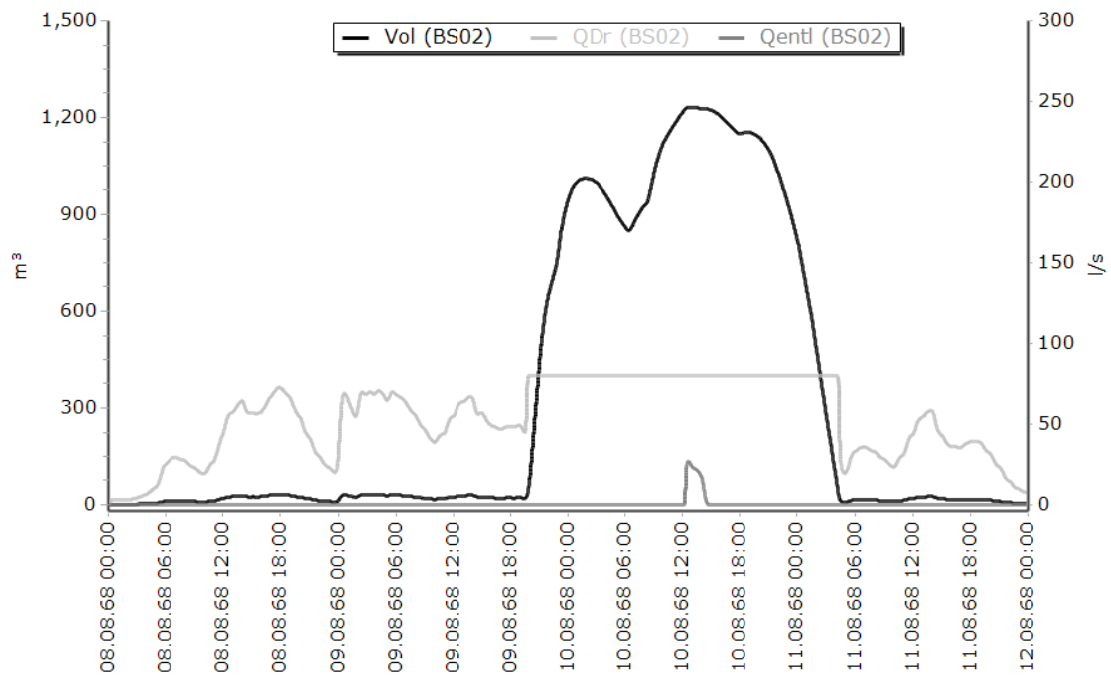


Abbildung A1.2: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS02 (Gesteuertes System)

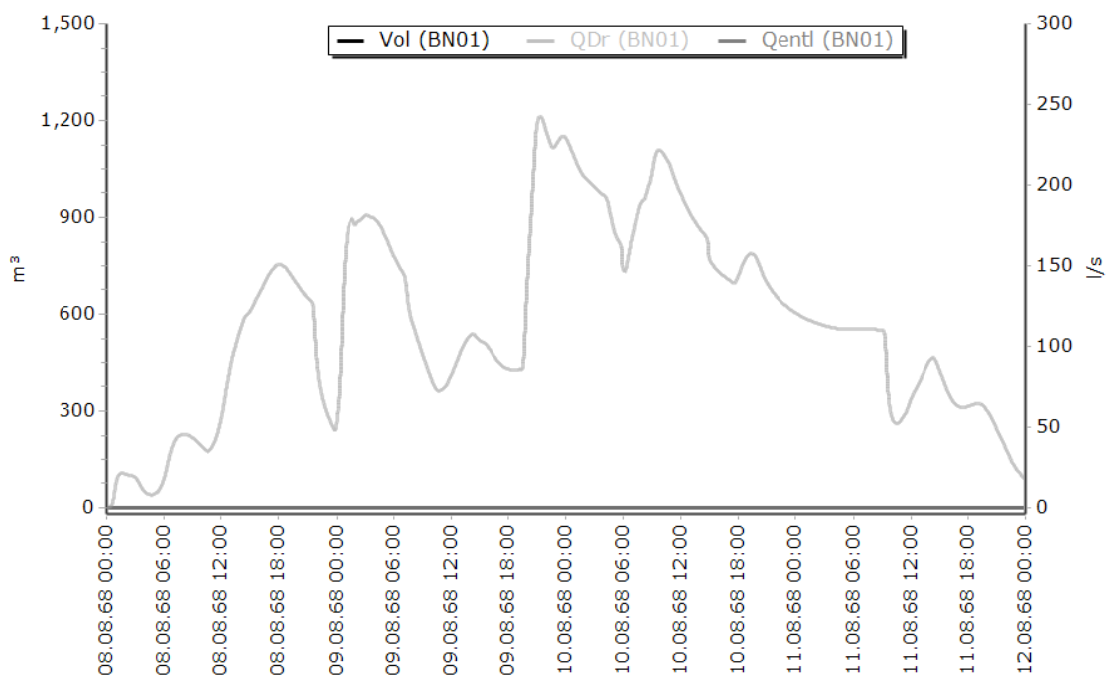


Abbildung A1.3: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BN01 (Ungesteuertes System)

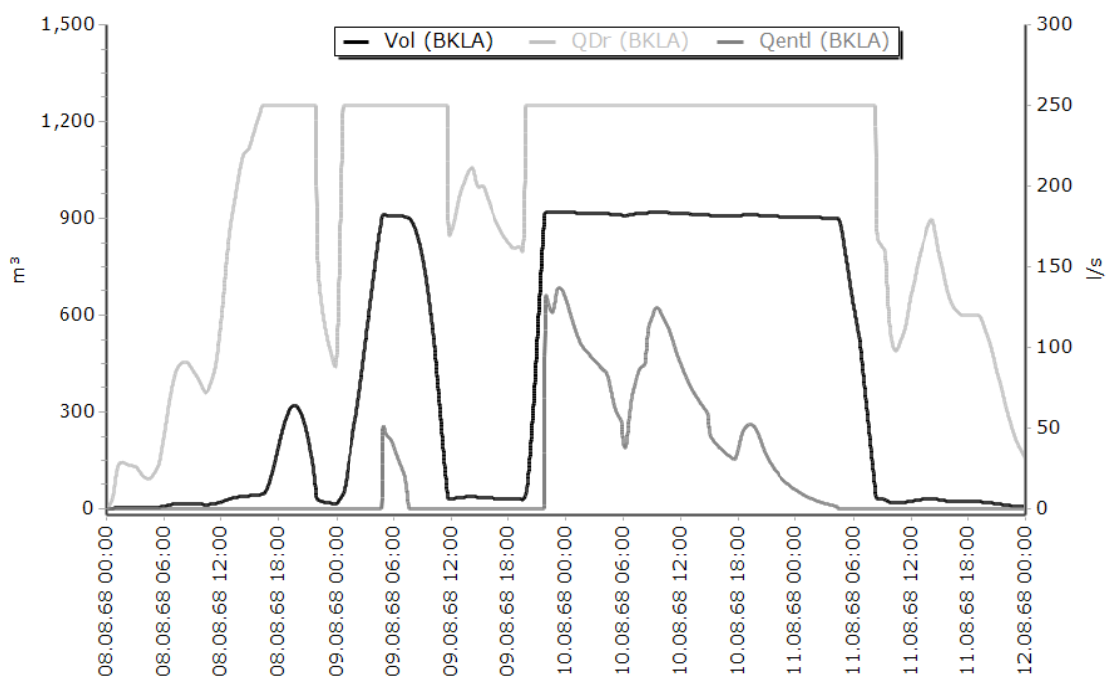


Abbildung A1.4: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BKLA (Ungesteuertes System)

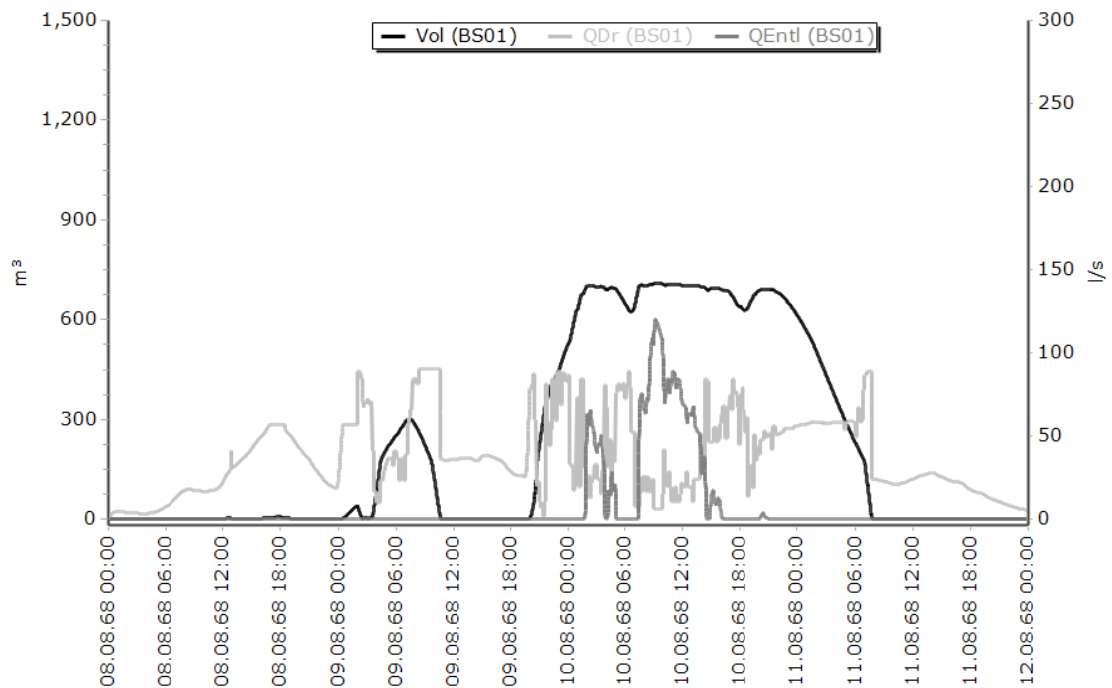


Abbildung A1.5: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS01 (H&J, EH: 2 h)

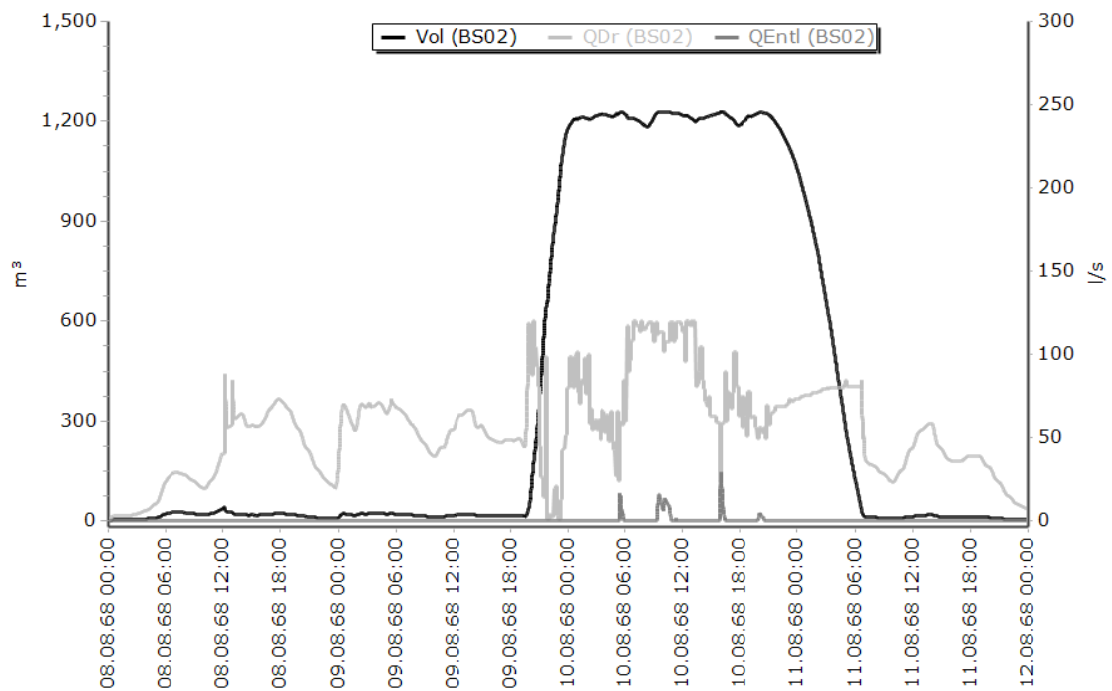


Abbildung A1.6: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS02 (H&J, EH: 2 h)

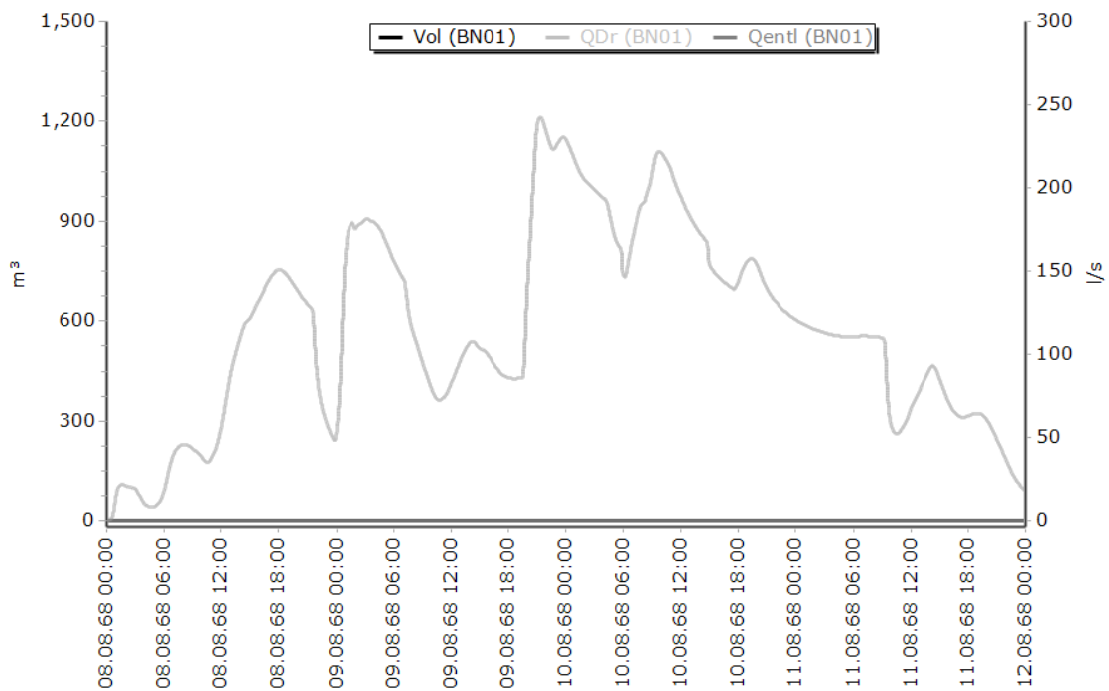


Abbildung A1.7: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BN01 (H&J, EH: 2 h)

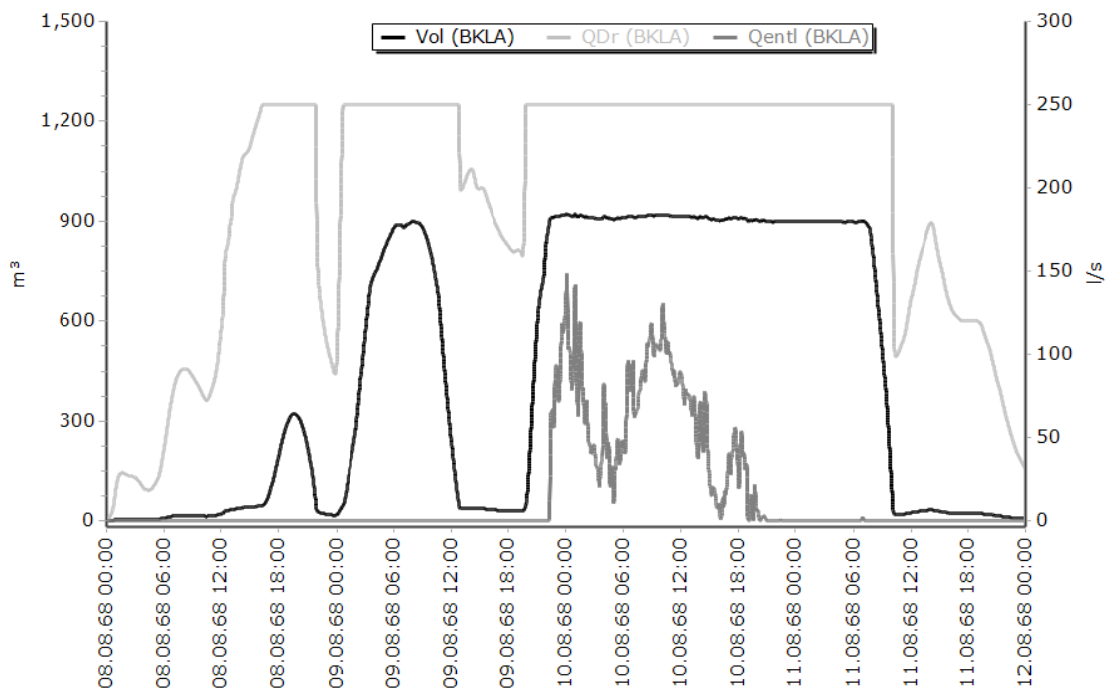


Abbildung A1.8: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BKLA (H&J, EH: 2 h)

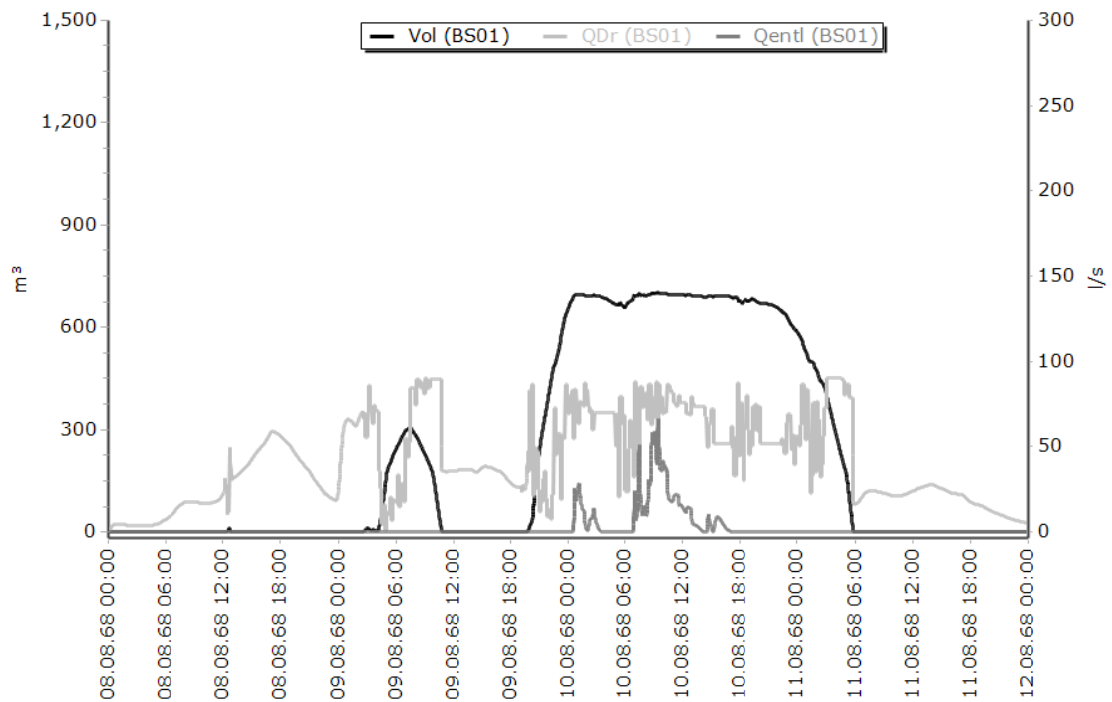


Abbildung A1.9: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS01 (PES, EH: 2 h)

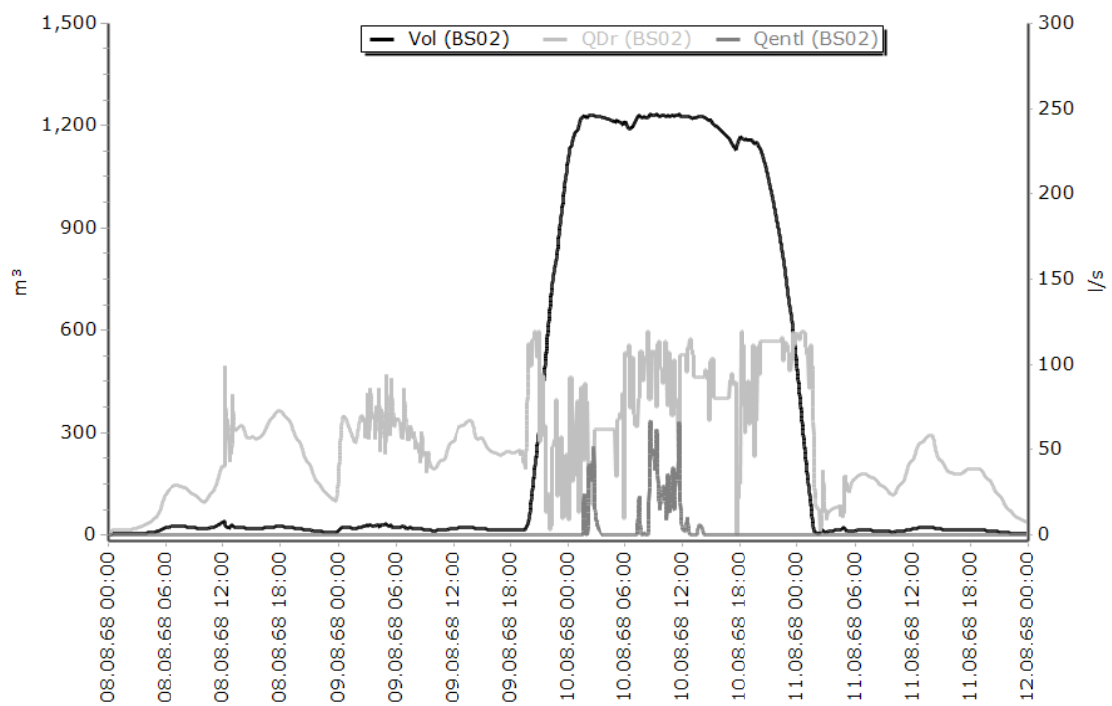


Abbildung A1.10: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS02 (PES, EH: 2 h)

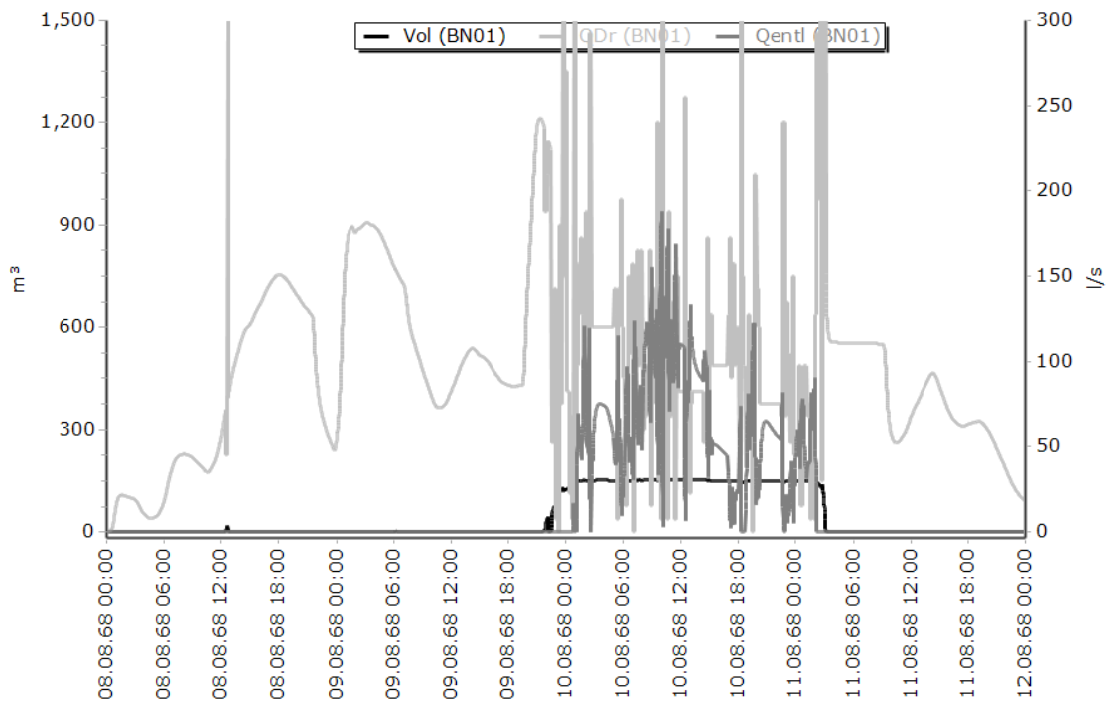


Abbildung A1.11: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BN01 (PES, EH: 2 h)

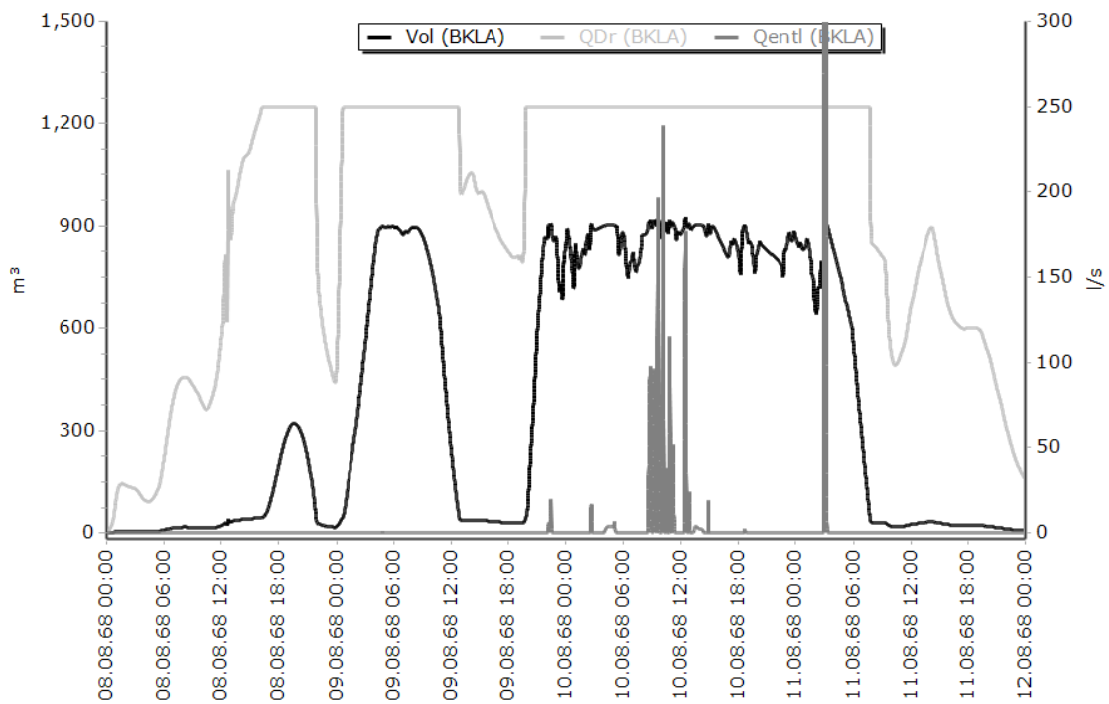


Abbildung A1.12: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BKLA (PES, EH: 2 h)

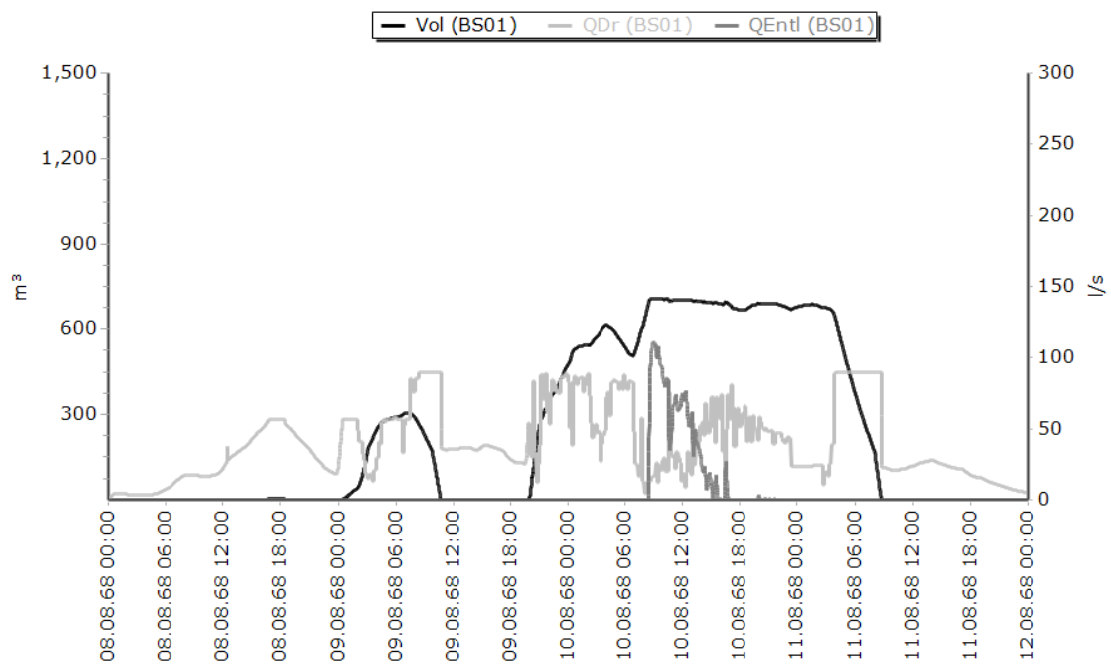


Abbildung A1.13: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS01 (H&J, EH: 5 h)

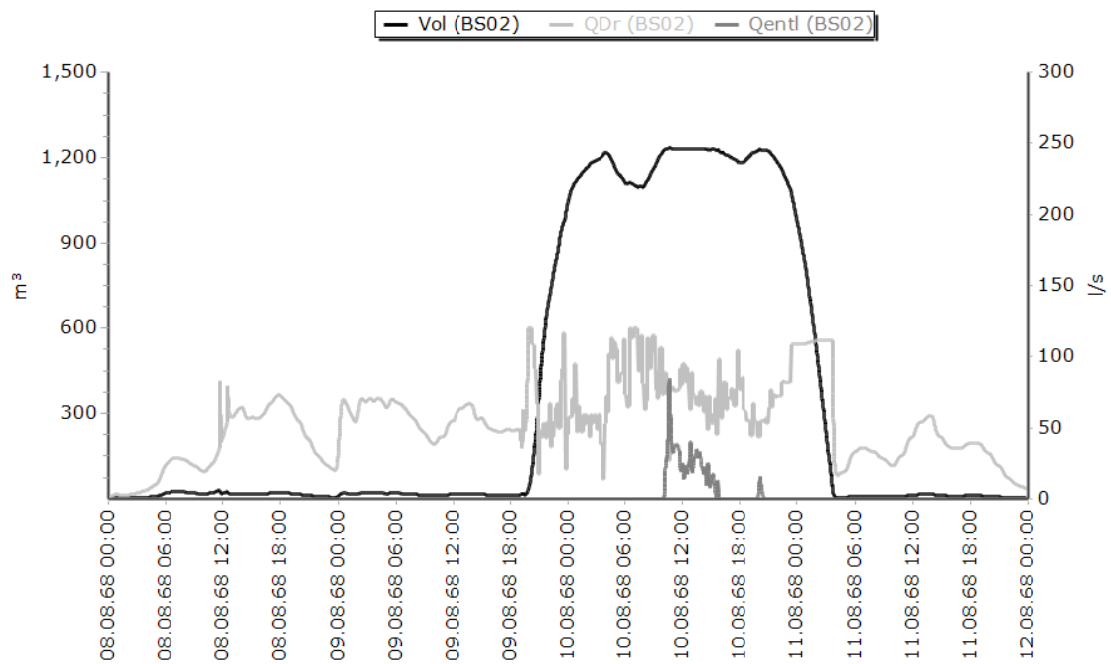


Abbildung A1.14: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS02 (H&J, EH: 5 h)

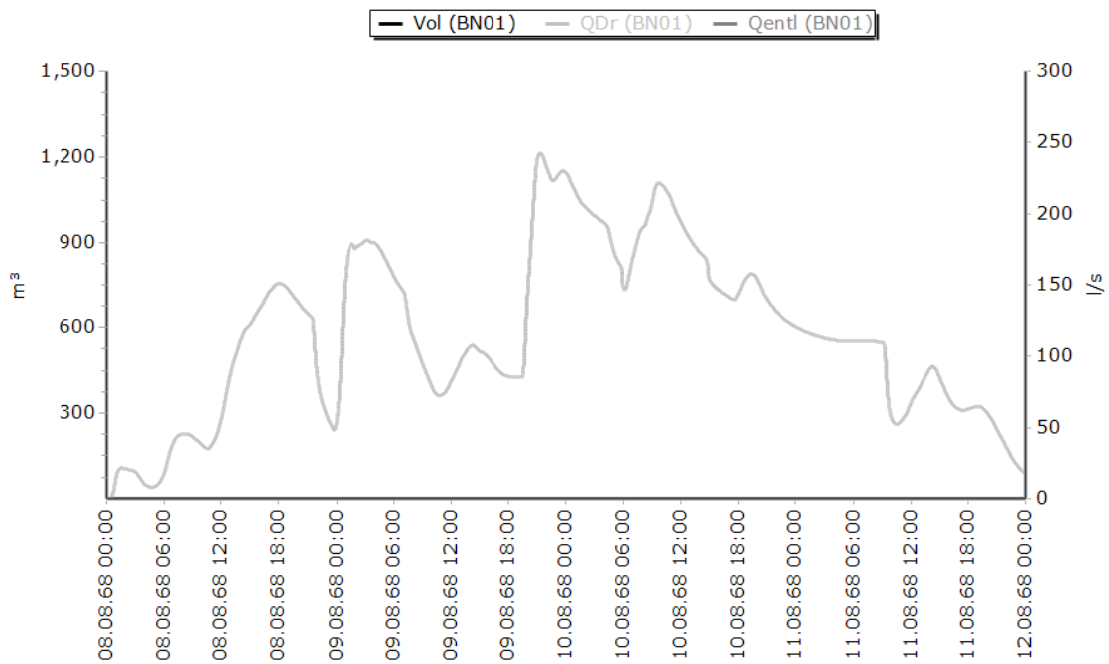


Abbildung A1.15: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BN01 (H&J, EH: 5 h)

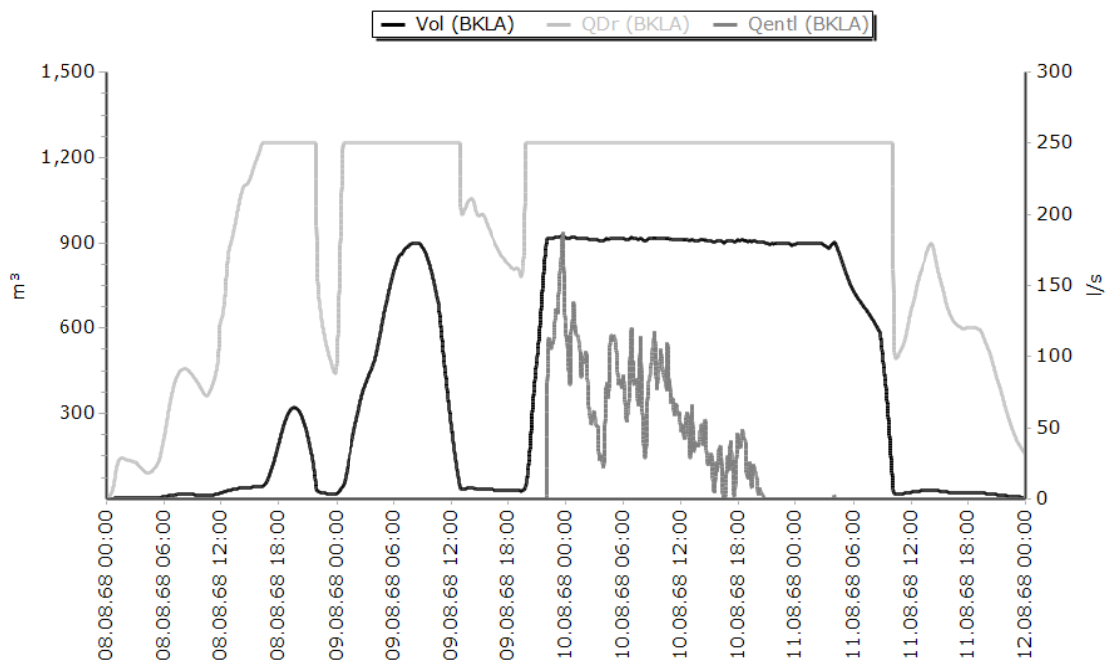


Abbildung A1.16: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BKLA (H&J, EH: 5 h)

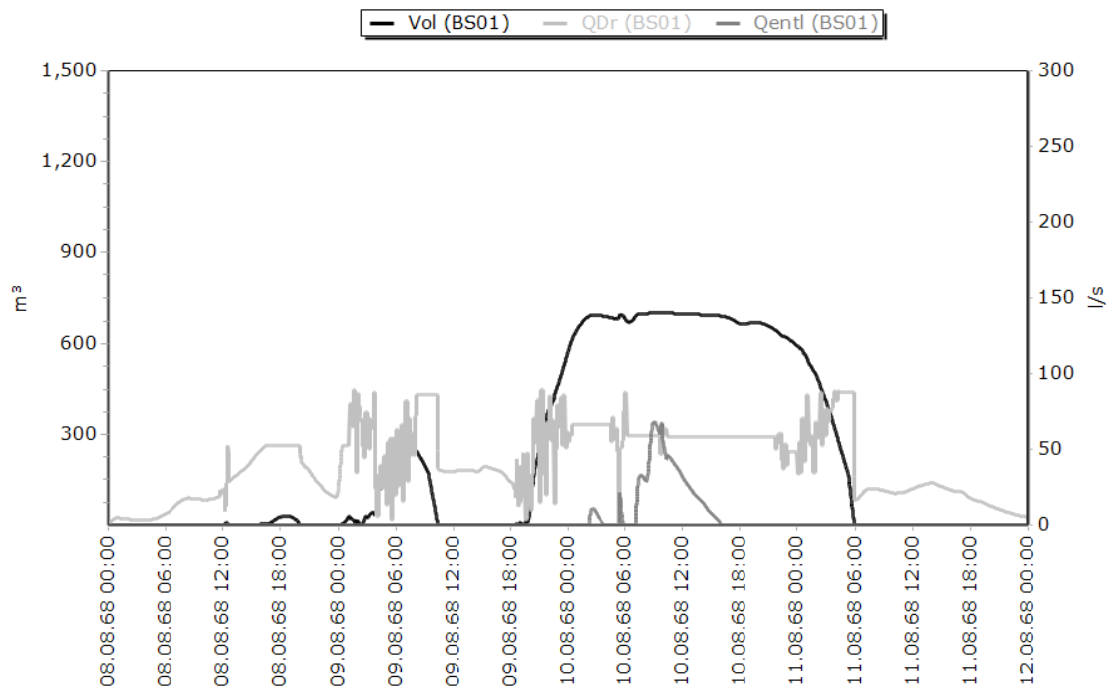


Abbildung A1.17: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS01 (PES, EH: 5 h)

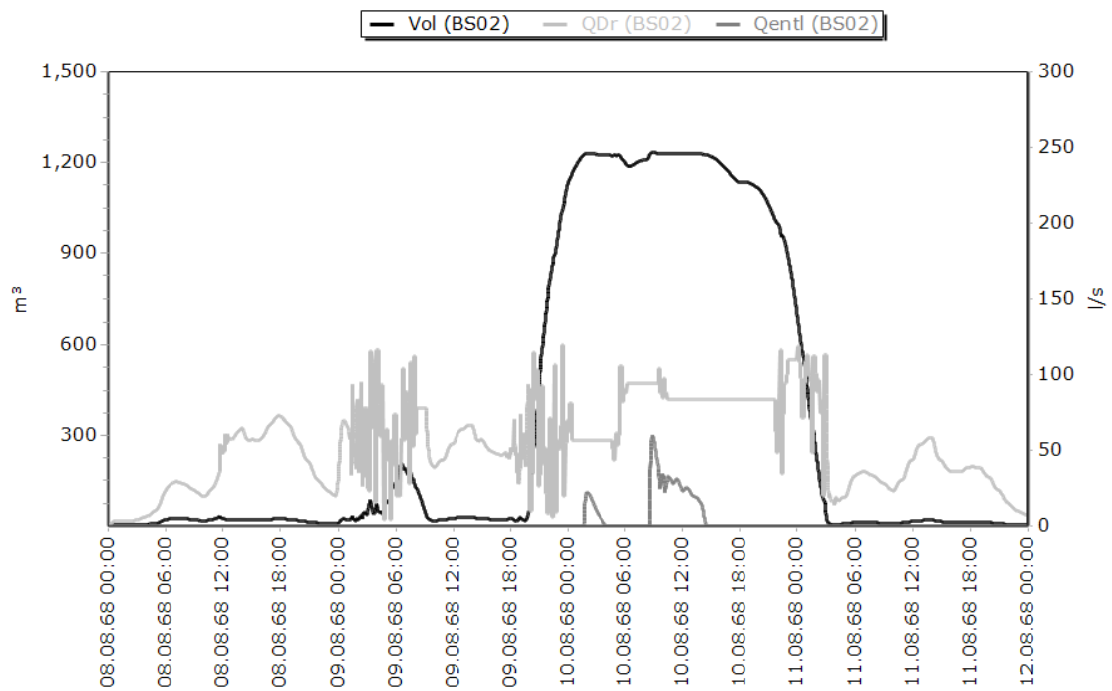


Abbildung A1.18: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BS02 (PES, EH: 5 h)

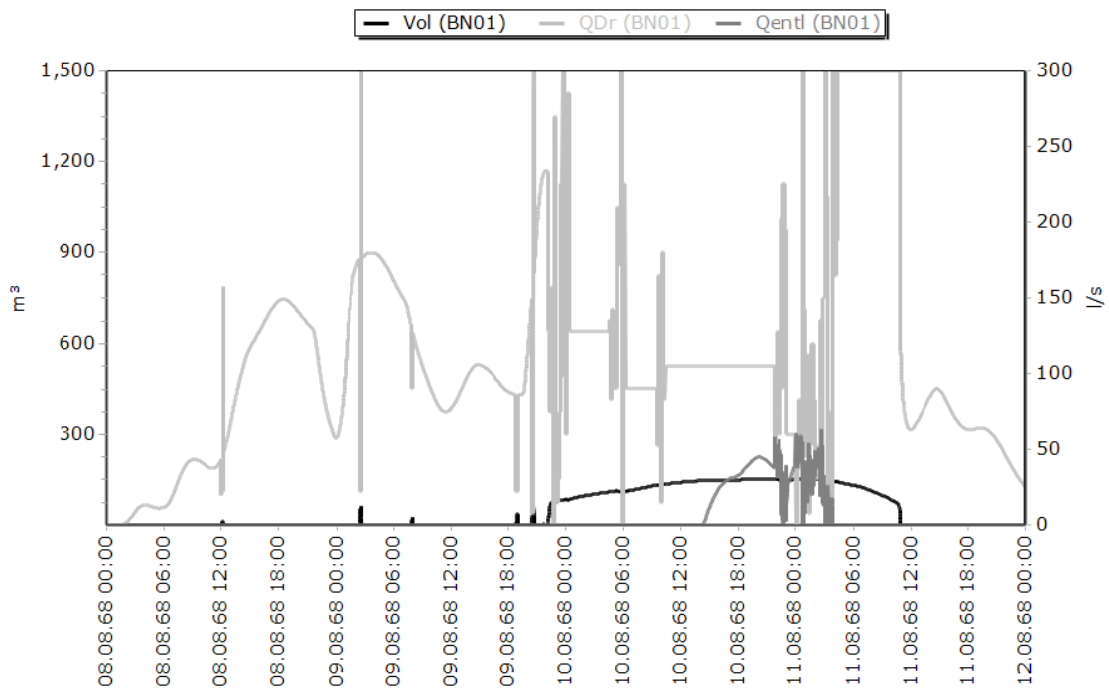


Abbildung A1.19: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BN01 (PES, EH: 5 h)

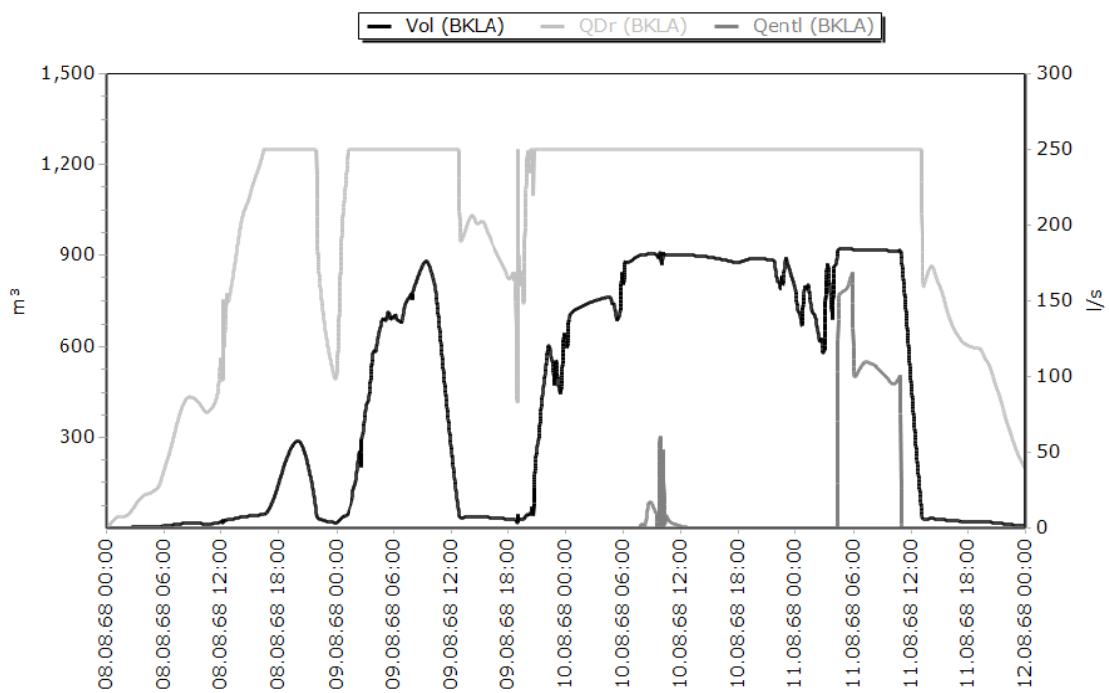


Abbildung A1.20: Fallbeispiel 2 – Volumen- und Abflussganglinien für Becken BKLA (PES, EH: 5 h)

Anhang 2: Ergebnissganglinien für Fallbeispiel 3

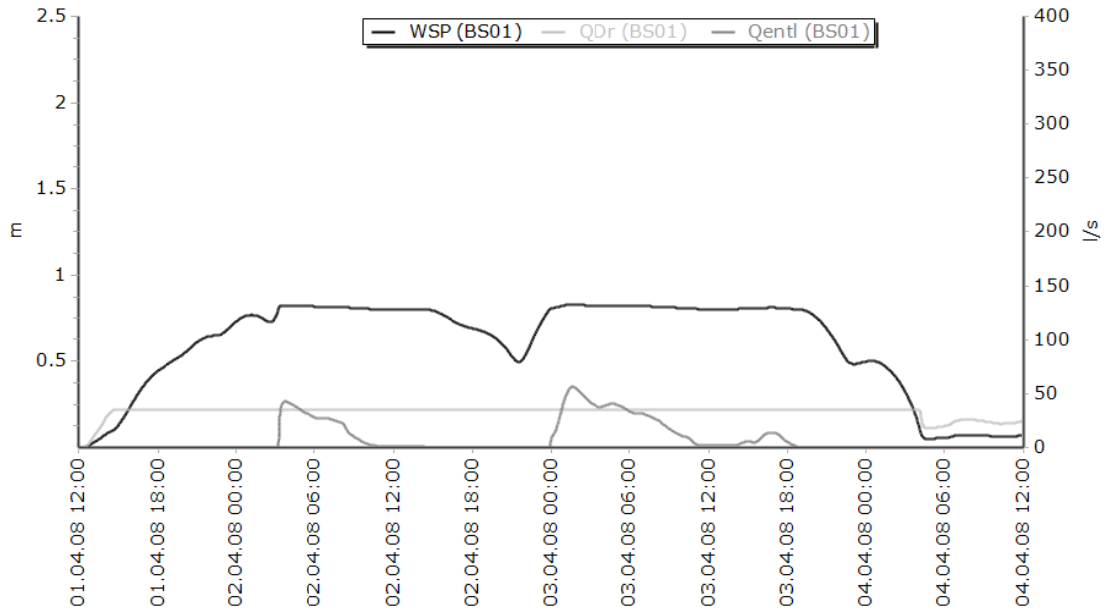


Abbildung A2.1: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BS01 (Ungesteuertes System)

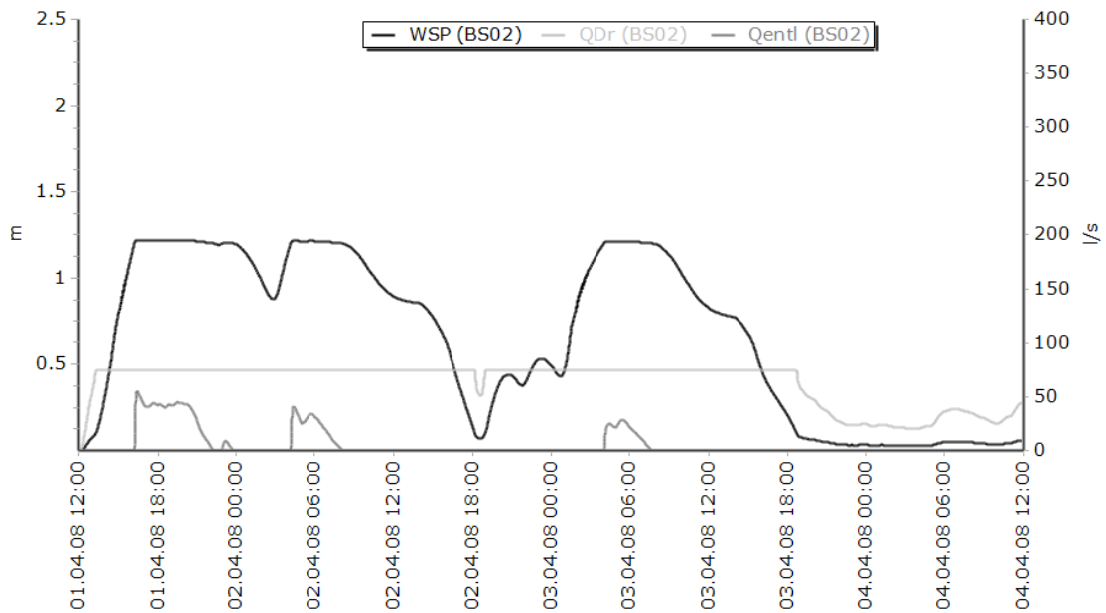


Abbildung A2.2: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BS02 (Ungesteuertes System)

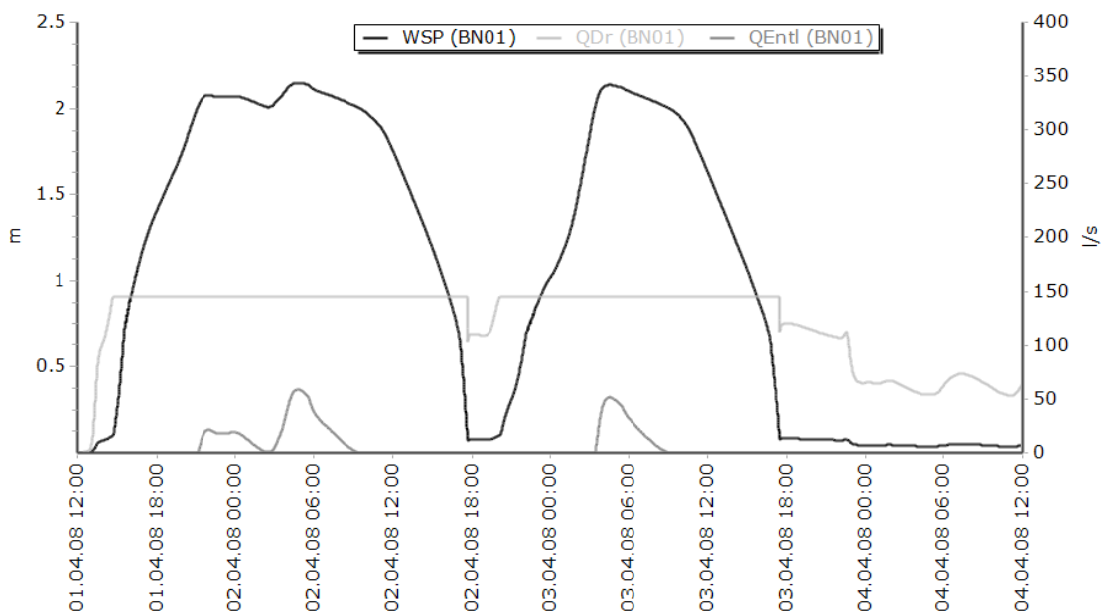


Abbildung A2.3: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BN01 (Ungesteuertes System)

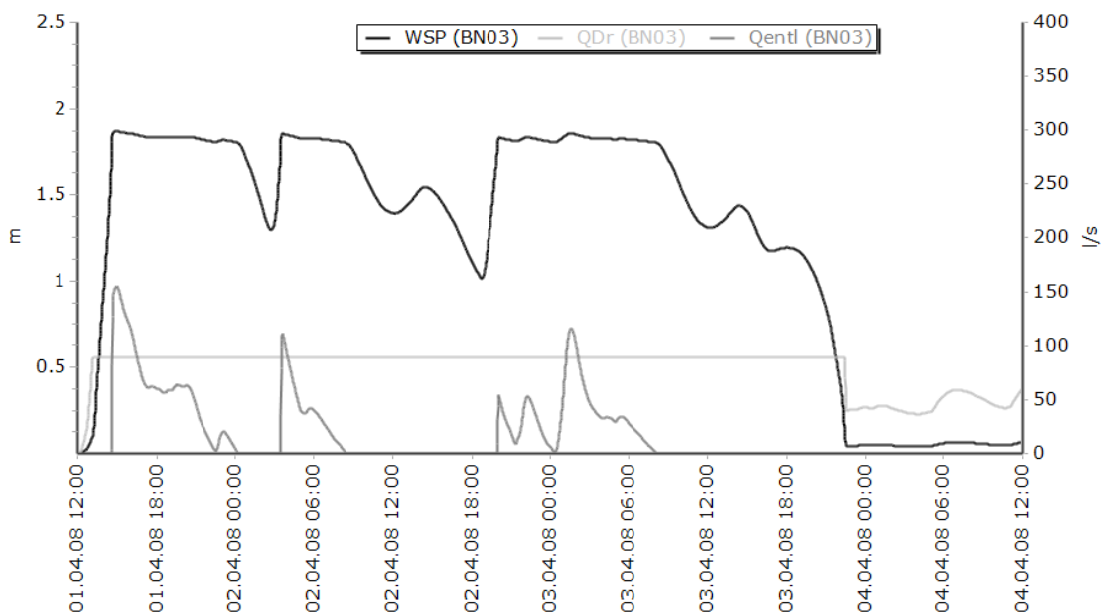


Abbildung A2.4: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BN03 (Ungesteuertes System)

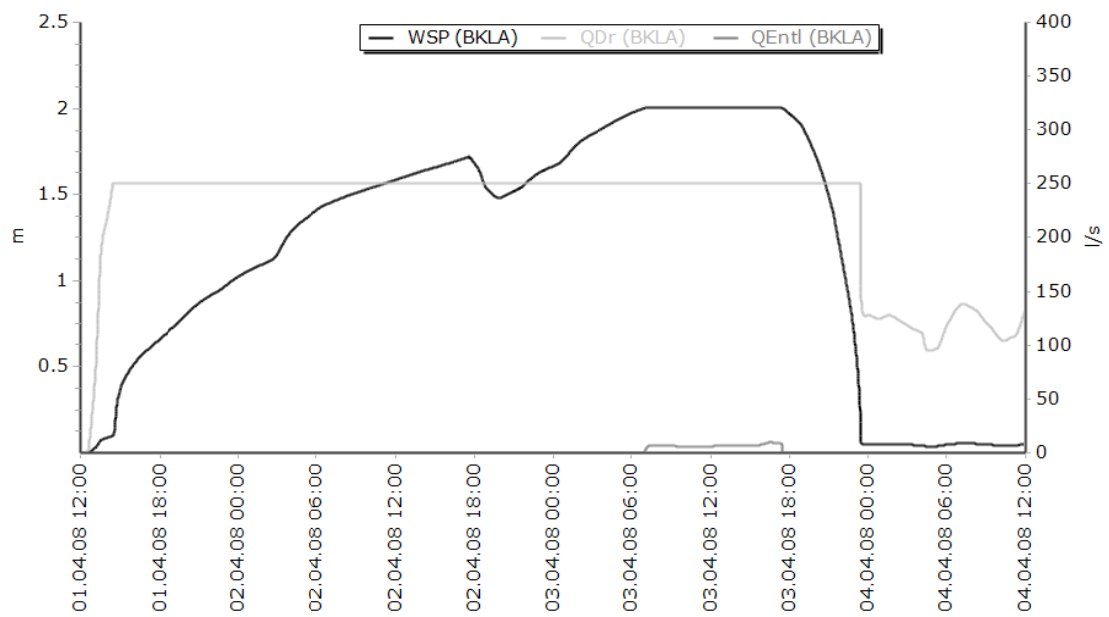


Abbildung A2.5: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BKLA (Ungesteuertes System)

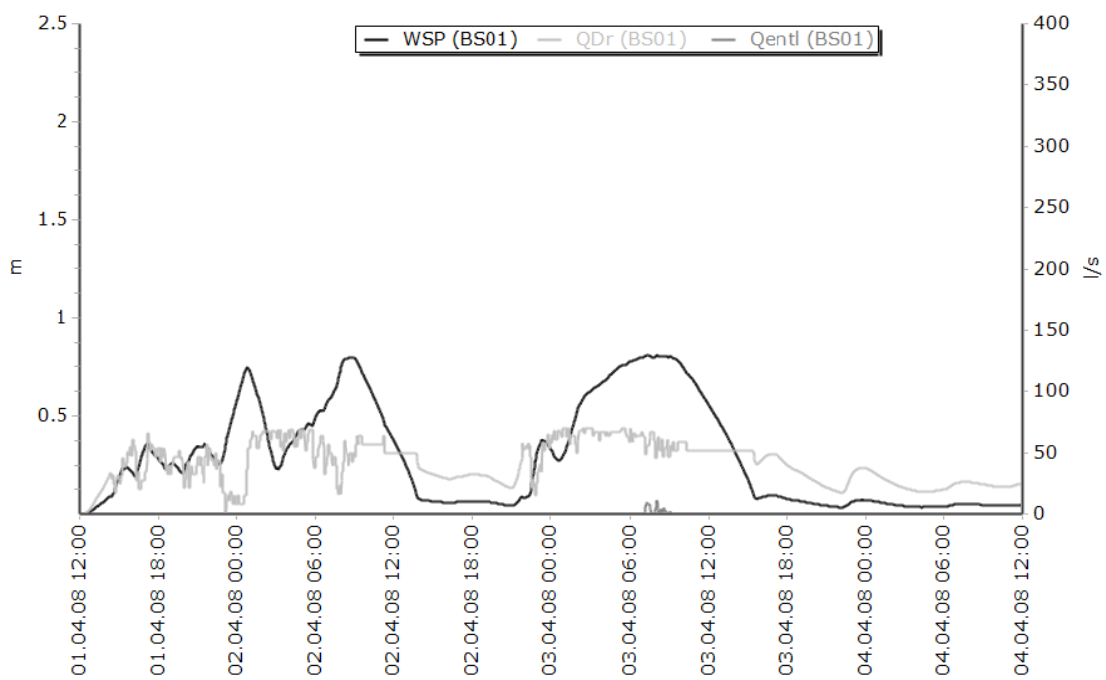


Abbildung A2.6: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BS01 (H&J)

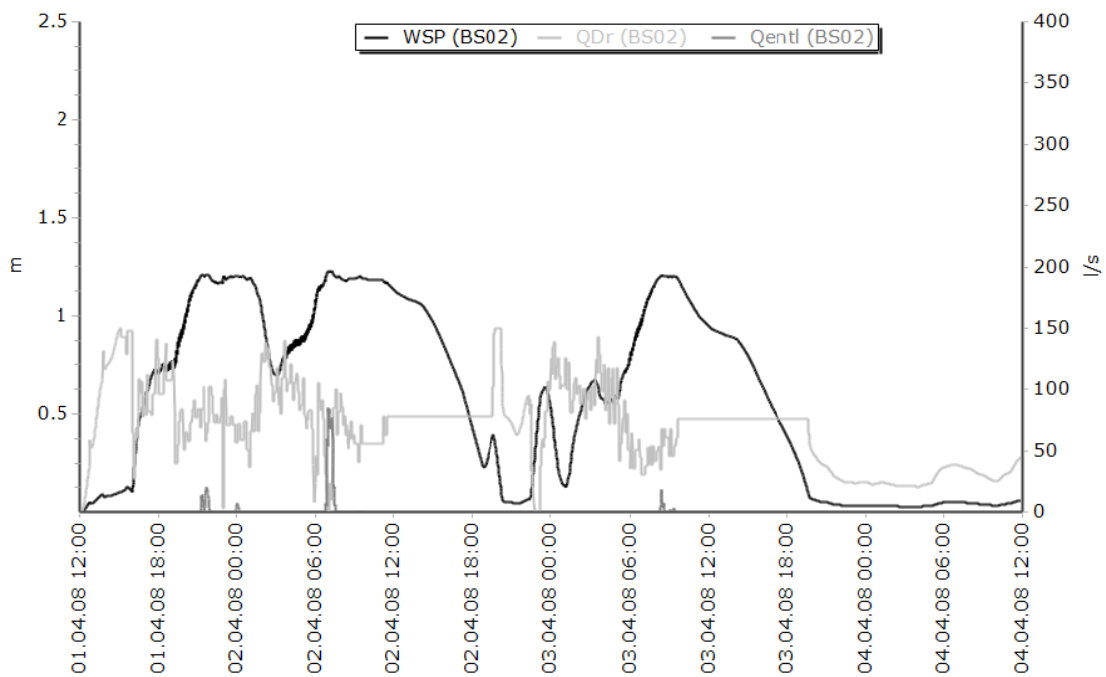


Abbildung A2.7: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BS02 (H&J)

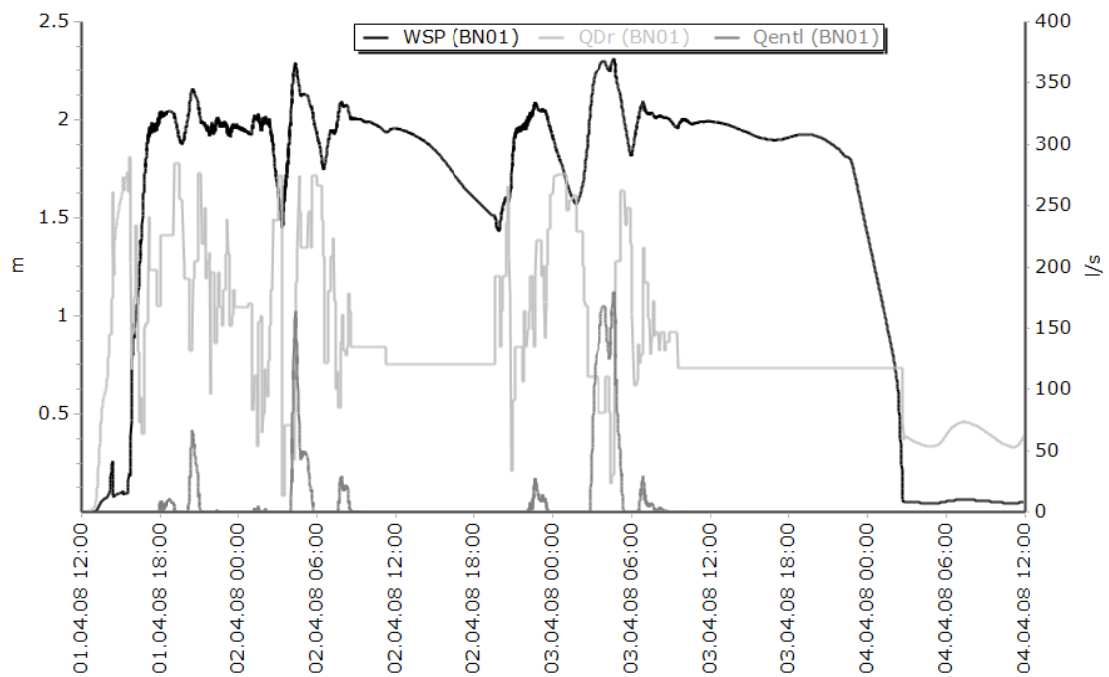


Abbildung A2.8: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BN01 (H&J)

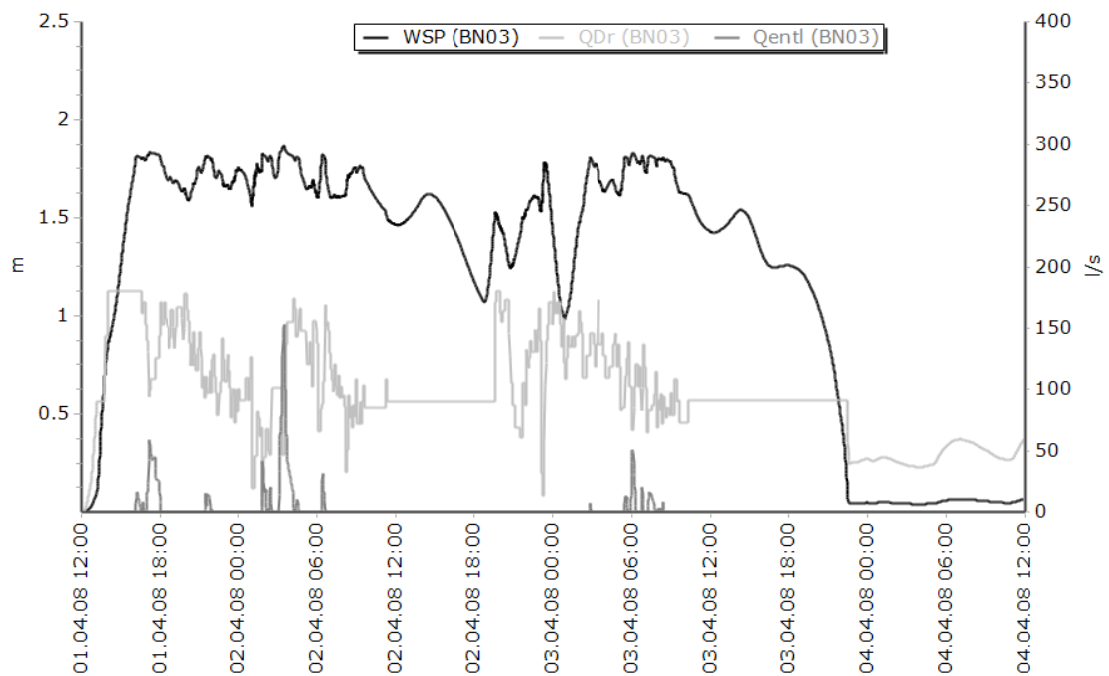


Abbildung A2.9: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BN03 (H&J)

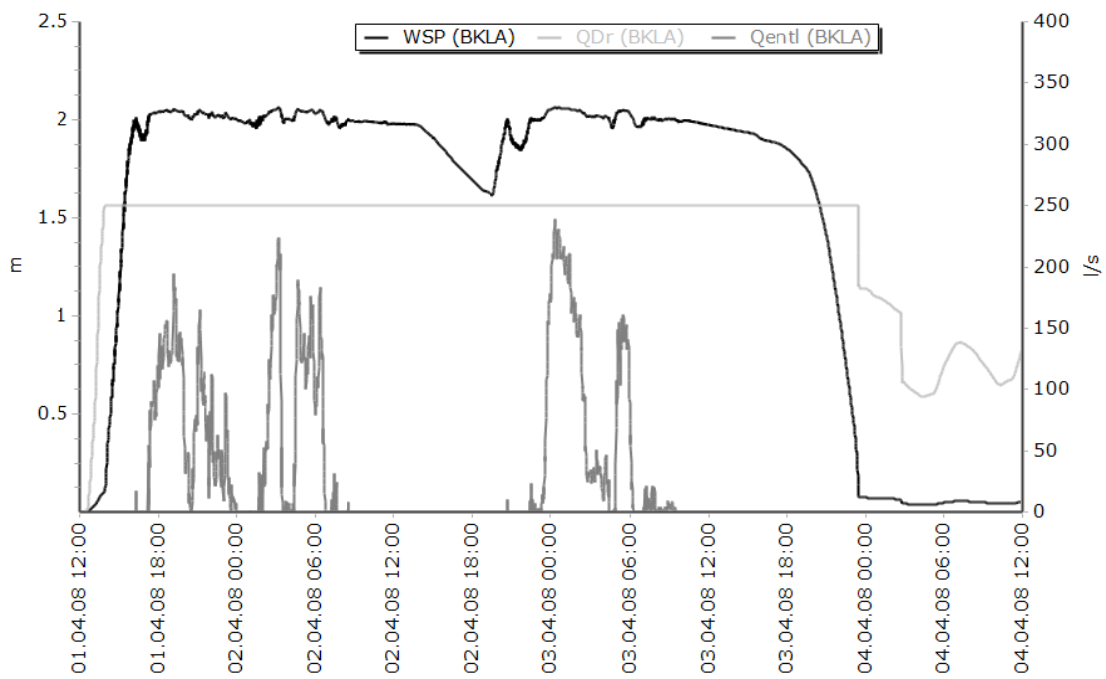


Abbildung A2.10: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BKLA (H&J)

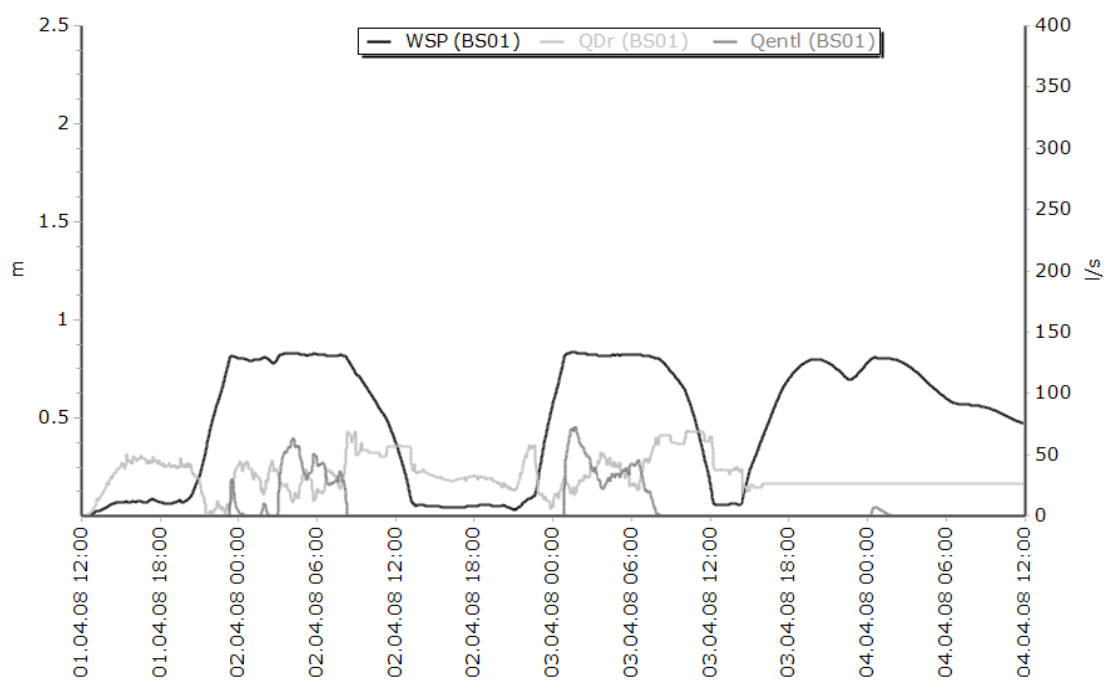


Abbildung A2.11: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BS01 (PES)

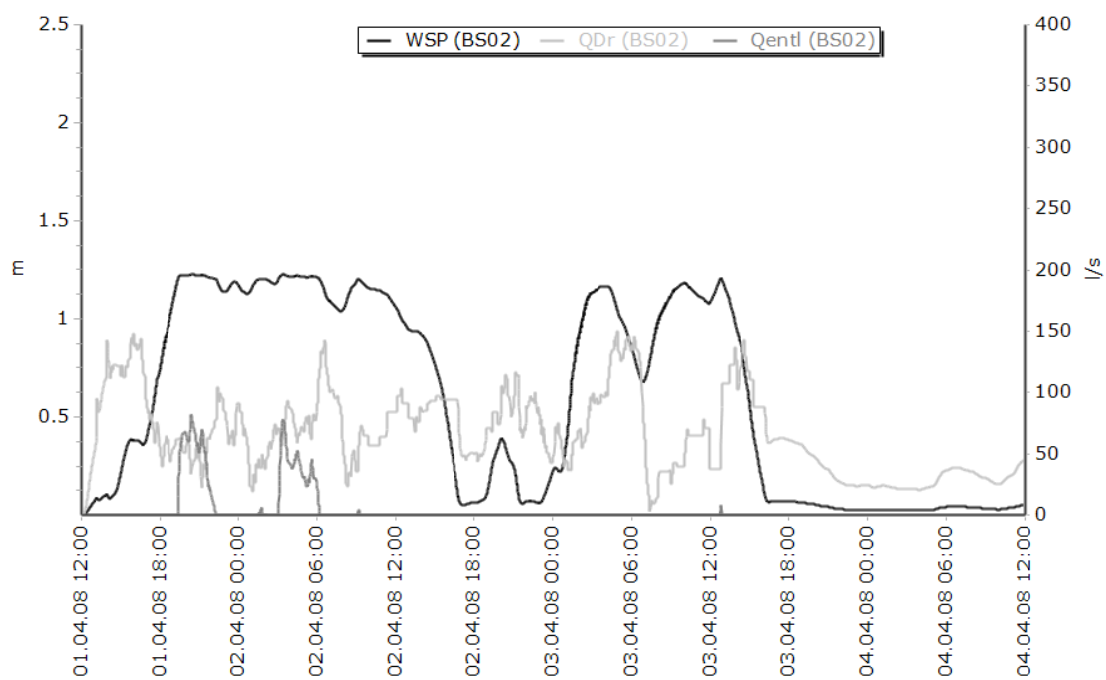


Abbildung A2.12: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BS02 (PES)

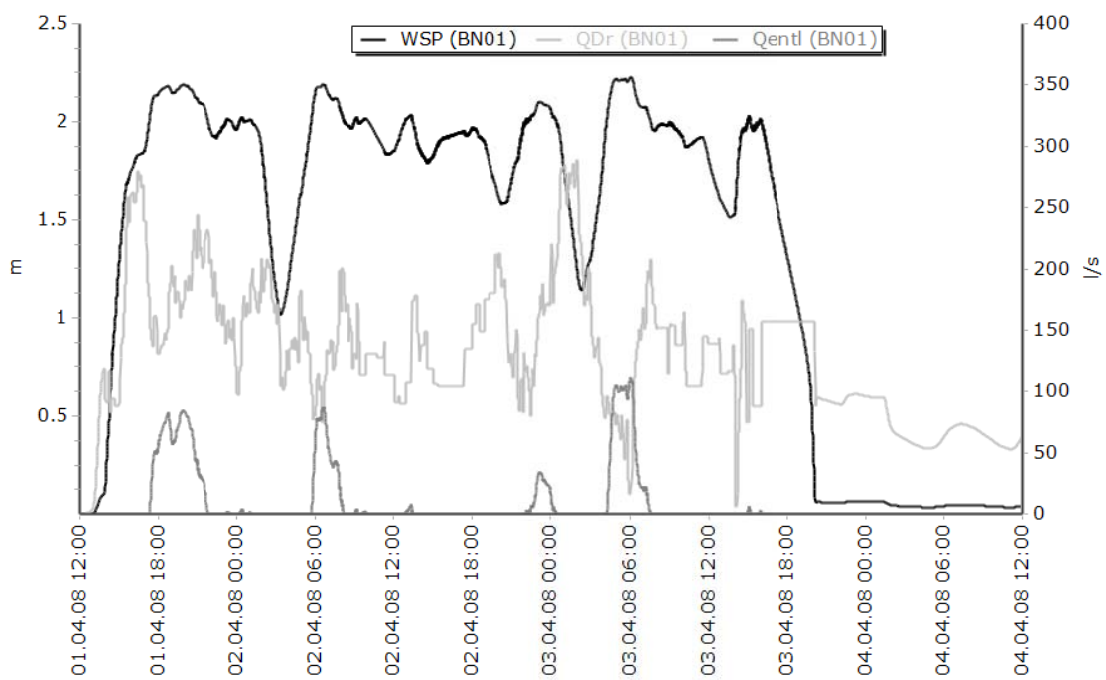


Abbildung A2.13: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BN01 (PES)

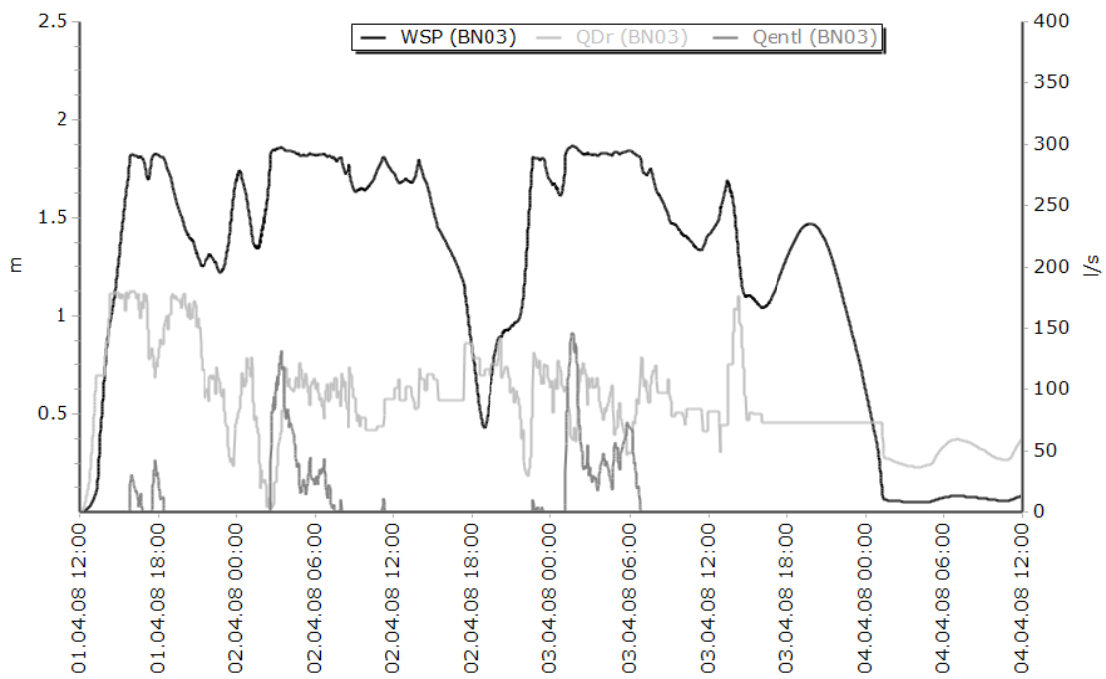


Abbildung A2.14: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BN03 (PES)

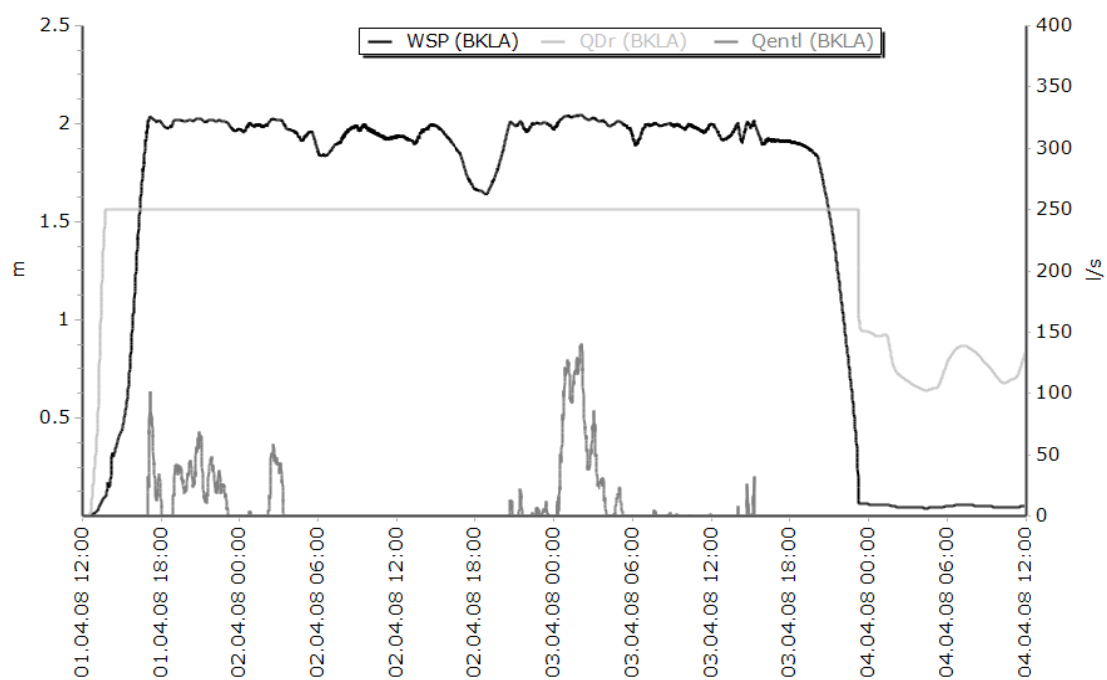


Abbildung A2.15: Fallbeispiel 3 – Wasserspiegel- und Abflussganglinien für Becken BKLA (PES)



Wissenschaftlicher Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name	Steffen Heusch
Geburtstag	18.06.1971
Familienstand	Verheiratet

Studium:

10/90 – 05/98	Bauingenieurwesen an der TU Darmstadt, Abschluss mit dem akademischen Grad Diplom-Ingenieur, Hauptvertiefungsfach: Wasserbau, Vertiefungsfächer: Wasserversorgung, Abwassertechnik, Geotechnik
08/94 – 06/95	Auslandsstudium an der University of Strathclyde, Glasgow

Berufliche Laufbahn:

10/98 – 05/02	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
06/02 – 09/07	Projektingenieur in der Fa. Sydro Consult, Darmstadt
10/07 – 03/11	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
seit 04/11	Projektingenieur in der Fa. Sydro Consult, Darmstadt
